



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**TESE DE MESTRADO
EM CLIMA E AMBIENTE ATMOSFÉRICO**

Especialidade: Meteorologia, Clima e Alterações Climáticas

João Lona Tchedná

**Dinâmica da Monção Oeste Africana (MOA)
e a Variabilidade de Precipitação Sazonal no SAHEL;
Impactos sobre as Populações e sobre os Ecossistemas**

Orientador: Professor Doutor João Corte Real
Universidade de Évora – Portugal

Co-orientador: Professor Doutor Abou Amani
Centro Regional AGRHYMET, Niamey - Niger

" Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri "
Évora – 2006

UNIVERSIDADE DE ÉVORA

**TESE DE MESTRADO
EM CLIMA E AMBIENTE ATMOSFÉRICO**

Especialidade: Meteorologia, Clima e Alterações Climáticas

João Lona Tchedná

**Dinâmica da Monção Oeste Africana (MOA)
e a Variabilidade de Precipitação Sazonal no SAHEL;
Impactos sobre as Populações e sobre os Ecossistemas**

Orientador: Professor Doutor João Corte Real
Universidade de Évora – Portugal

Co-orientador: Professor Doutor Abou Amani
Centro Regional AGRHYMET, Niamey - Niger



160 703

**Este trabalho foi financiado pelo GRICES/FCT:
Bolsa de Investigação em C&T; Ref.^a: SFRH/BM/15358/2005
Programa de Formação Avançada destinado aos PALOPs e Timor**



Financiamento do Fundo Social Europeu e de fundos nacionais do MCTES



AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o concurso de várias entidades e individualidades que tornou possível a realização e a materialização deste sonho. Sinto-me na obrigação de apresentar à todos os meus sinceros reconhecimentos e gratidão.

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao GRICES (Gabinete de Relações Internacionais da Ciência e do Ensino Superior) e a FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia), por me ter contemplado com a bolsa, no âmbito do Programa de Formação Avançada destinado aos PALOPs e Timor-Leste, e pelo todo o apoio financeiro posto a minha disposição, o que permitiu a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer a Comissão do Mestrado do Departamento da Física – Centro Geofísico da Universidade de Évora por ter aceite a minha candidatura e me ter admitido ao Curso de Mestrado em Clima e Ambiente Atmosférico; em especial agradecer a Professora Doutora Ana Maria Silva, Coordenadora Científica e Directora do Mestrado em Clima e Ambiente Atmosférico da Universidade de Évora, pelo seu apoio, sua competência, sua franca colaboração e cooperação que nos tem testemunhado ao longo de todo o processo desta formação.

Igualmente, a minha gratidão e sinceros agradecimentos ao Professor Doutor João Medina Corte Real por me ter dado a oportunidade e privilégio de partilhar a sua experiência, o seu "*savoir et savoir-faire*", e particularmente ter aceite de orientar e coordenar este trabalho de dissertação e sobretudo pela atenção que me tem prestado ao longo do processo.

Os meus agradecimentos ao Professor Doutor Abou Amani – Chefe da Unidade Informação e Pesquisa do Centro Regional AGRHYMET, por ter aceite de ser Co-orientador deste trabalho, pela sua colaboração, seu apoio incondicional, seus conselhos e orientações, sua assistência ao longo deste trabalho.

Apresento os meus agradecimentos aos Centros ACMAD e AGRHYMET, instituições regionais africanas interessadas no estudo do clima da África Ocidental e o ciclo de água que lhe é associado e que participam no Programa Internacional de Análise Multidisciplinar da Monção Africana (AMMA). Particularmente ao Dr. Issa Martin Bikienga, Director Geral do Centro Regional AGRHYMET, e Dr. Abdoulaye Kignaman-Soro, Director Geral do Centro ACMAD, pelo interesse que têm manifestado sobre o tema do nosso trabalho e me terem admitido em estágio nos seus respectivos centros, no quadro da preparação desta tese, apesar das dificuldades que estes centros atravessam.

Ao Dr. André Kamga Fouamouhoue, Chefe de Divisão de Pesquisa e Desenvolvimento em Clima e Ambiente do Centro ACMAD, pela sua colaboração e supervisão do nosso programa de estágio, realizado no Centro ACMAD, no âmbito da preparação desta tese.

Agradeço todo o pessoal da Direcção Geral da Meteorologia Nacional da Guiné-Bissau (DGMN-GB), em particular, o Eng.º Malam da Silva, Director-Geral, pelo todo o apoio e encorajamento.

Ao colectivo dos Docentes da 3ª Edição do Mestrado em Clima e Ambiente Atmosférico da Universidade de Évora, o meu grade obrigado.

Aos colegas da 3ª Edição do Mestrado em Clima e Ambiente Atmosférico; particularmente, a Susana Mendes e a Ester Araújo de Brito, pela colaboração e apoios que me têm dado e à todo o Pessoal da Universidade de Évora, em especial para D. Cândida Guerreiro, os meus agradecimentos pela sua pronta assistência e apoio.

Meus sinceros reconhecimentos ao Eng.º Quintino Blete Merik, pela atenção e apoio que me tem prestado ao longo dos dois anos deste trabalho.

Estes reconhecimentos e agradecimentos são extensivos ao Dr. Eduardo Barai e a Família, em especial a sua esposa D. Edna Tavares Barai e sua filha Patrícia Suraia Barai, pela companhia e apoio moral que me tem dado ao longo dos dois anos passados em Évora.

Para todos aqueles que de forma directa ou indirecta têm contribuído para o sucesso desta formação, cujos nomes não figuram nesta lista, queiram aceitar os meus sinceros agradecimentos e reconhecimentos.

A memória da minha querida falecida Mãe – Dam Sumba Embana,

A minha Família: minha querida esposa,

Nelita Francisco Sene

e aos nossos filhos

- N' Simba,
- Codé, - Tcherná,
- Levy.

RESUMO

O presente trabalho analisa a dinâmica da monção oeste africana e a variabilidade da precipitação sazonal no Sahel e os impactos sobre as populações e sobre os ecossistemas, estando organizado em seis capítulos que se complementam.

Consiste num estudo diagnóstico da dinâmica da monção oeste africana, analisando o comportamento dos campos meteorológicos (energéticos, dinâmicos e higrométricos), durante as fases do início, de intensificação e do fim da monção no Sahel, nos dois anos de referência: 1984 (ano seco) e 1994 (ano chuvoso), com a finalidade de perceber a influência dos parâmetros meteorológicos na perturbação da monção oeste africana e consequentes impactos sobre as populações e sobre os ecossistemas.

A variabilidade de precipitação sazonal foi avaliada através dos métodos de análise estatística para a região Oeste e a região Este do Sahel. Destas análises destacam-se: os modelos de tendência, de sazonalidade e da periodicidade feita através dos espectros de frequência de precipitação anual, pelo método de entropia máxima. As previsões sazonais e a modelação climática, consistem nas previsões sazonais para a África Ocidental (PRESA-AO) e recorrem ao Modelo de Previsão Climática, CPT – *Climate Predictability Tools*; como exemplo de aplicação foi avaliado o desempenho do modelo CPT utilizando as saídas dos Modelos Dinâmicos de Circulação Global para melhorar as previsões climáticas sazonais, baseados nos métodos estatísticos.

Para este estudo foram utilizados os dados de Reanálises do NCEP/NCAR, os dados climatológicos de precipitação do CMAP e os dados de observações (precipitação no Sahel, 1960-2000), obtidos na base de dados do Centro Regional AGRHYMET, especializados nos pontos de grelha de 1° por 1° e 2.5° por 2.5° graus.

Conjugando a perturbação da monção oeste africana e a variabilidade da precipitação sazonal no Sahel com a tendência de evolução demográfica nos países do Sahel e estado de degradação dos ecossistemas, destaca-se os impactos sobre as populações e sobre os ecossistemas.

PALAVRAS CHAVES: Clima; Alterações Climáticas; Monção Oeste Africana; Variabilidade de Precipitação Sazonal no Sahel; Modelos de Previsão Climatológica; Populações e Ecossistemas.

**Dynamics of the West African Monsoon and the Variability of the Seasonal Precipitation in the Sahel;
Impacts on the Populations and Ecosystems**

ABSTRACT

The present work aims at studying the dynamics of the west African monsoon and the variability of the seasonal precipitation in the Sahel as well as the impacts on the populations and ecosystems. It is organized in six chapters

A diagnostic study of the dynamics of the west African monsoon is done by analyzing the behavior of the meteorological fields (energetic, dynamic and hygrometric), during the phases of the beginning, of intensification and the end of the monsoon in the Sahel for the reference years of 1984 (dry year) and of 1994 (rainy year), with the purpose of understanding the influence of the meteorological parameters in the disturbance of the west African monsoon and its impacts on the populations and ecosystems.

The seasonal precipitation variability was evaluated through the statistical methods of analyses both for the West and the East sectors of the Sahel region. Among different components of variability one can distinguish the following ones: trend, seasonal and periodic analysed via the annual precipitation spectra, using the maximum entropy method. The seasonal forecasts and the climate modeling focus on the Seasonal Forecasts for West Africa (PRESA-AO) and are based on the Model of Climatic Forecast, CPT - Climate Predictability Tools; as an example of application the performance of CPT was analysed using the output of the Global Circulation Dynamic Models for improving the seasonal climatic forecasts, based on statistical methods.

For this study the Reanalysis of the NCEP/NCAR data, the CMAP precipitation climate data and the precipitation data in the Sahel, for the 1960-2000 period from the Regional Center AGRHYMET database have been used, and specialized in the points of grid of 1 ° by 1 ° and 2.5 ° by 2.5 ° degrees.

Conjugating the disturbance of the west African monsoon and the variability of the seasonal precipitation in the Sahel region with the trend of demographic evolution in the countries of the Sahel and state of degradation of ecosystems, the impacts on the populations and ecosystems are emphasized.

KEYS WORDS: Climate; Climate Change; West African monsoon; Seasonal Precipitation variability in the Sahel; Models of Climate Forecast; Populations and Ecosystems.

INDICE

| | Pág. |
|--|------|
| AGRADECIMENTOS | i |
| RESUMO | iv |
| ABSTRACT | v |
| LISTA DE FIGURAS E DAS TABELAS | viii |
| CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1. Contexto e motivações | 1 |
| 1.2. Objectivos | 4 |
| 1.3. Organização da dissertação | 5 |
| CAPÍTULO II: REGIÃO DE ESTUDO, DADOS E METODOLOGIA | 6 |
| 2.1. Região de Estudo | 6 |
| 2.2. Dados e Metodologia | 9 |
| 2.2.1. Dados | 9 |
| 2.2.1.1. Reanálises do NCEP/NCAR | 9 |
| 2.2.1.2. Dados Observados | 12 |
| 2.1.2. Metodologia | 13 |
| CAPÍTULO III: DINÂMICA DA MONÇÃO OESTE AFRICANA; CONSTATAÇÕES E DIAGNÓSTICO | 16 |
| 3.1. Monção Oeste Africana (MOA) | 17 |
| 3.1.1. Características da Monção Oeste Africana | 18 |
| 3.1.2. Novo Modelo da Monção Oeste Africana | 19 |
| 3.1.3. Salto brusco da ZCIT | 20 |
| 3.1.4. Escalas da Monção Oeste Africana | 21 |
| 3.1.5. Períodos de Observações | 22 |
| 3.1.5.1. Período de Observações Especiais (SOP) | 22 |
| 3.1.5.2. Período de Observações ao Longo Prazo (LOP) | 24 |
| 3.1.5.3. Período de Observações Reforçadas | 25 |
| 3.1.6. Ciclo Sazonal | 26 |
| 3.1.7. Regiões da MOA e os mecanismos associados | 27 |
| 3.1.7.1. Centros de Altas Pressões Subtropicais | 27 |
| 3.1.7.2. Ondas de Leste | 29 |
| 3.1.7.3. Linhas de borrascas | 30 |
| 3.1.7.4. ZCIT | 31 |
| 3.1.8. Dinâmica da Monção Oeste Africana | 32 |
| 3.2. Constatações | 34 |
| 3.3. Diagnóstico | 34 |
| 3.3.1. Parâmetros Energéticos | 35 |
| 3.3.2. Parâmetros Dinâmicos | 50 |
| 3.3.3. Parâmetros Higrométricos | 61 |
| 3.4. Conclusões | 67 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO IV: VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO SAZONAL NO SAHEL; PREVISÃO SAZONAL | 68 |
| 4.1. Regime Pluviométrico no Sahel | 68 |
| 4.2. Análise Estatística da Série Temporal de Precipitação | 71 |
| 4.2.1. Tendência da Série | 71 |
| 4.2.2. Índice de Precipitação Anual | 73 |
| 4.2.3. Precipitação Média Mensal | 74 |
| 4.2.4. Sazonalidade | 76 |
| 4.2.5. Variabilidade Interanual de Precipitação | 78 |
| 4.2.6. Análise Espectral da Precipitação pelo Método de Entropia Máxima | 79 |
| 4.3. Modelação Climática | 80 |
| 4.3.1. Previsão Sazonal de Precipitação no Sahel | 80 |
| 4.3.2. Modelo CPT (Climate Predictability Tools) | 81 |
| 4.4. Conclusões | 84 |
| CAPÍTULO V: IMPACTOS DA DINÂMICA DA MONÇÃO OESTE AFRICANA E DA VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO SAZONAL NO SAHEL, SOBRE AS POPULAÇÕES E SOBRE OSECOSSISTEMAS | 86 |
| 5.1. Impactos sobre as Populações | 86 |
| 5.2. Impactos sobre os ecossistemas | 91 |
| 5.3. Conclusões | 95 |
| CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES GERAIS, SUGESTÕES E PERSPECTIVAS | 96 |
| 6.1. Conclusões e Sugestões | 96 |
| 6.2. Perspectivas Futuras | 98 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS | 99 |
| ANEXO – 1: Principais Laboratórios implicados no Programa AMMA | 105 |
| ANEXO – 2: Análises Estatísticas da Precipitação no Sahel-Este (15°E) | 107 |
| ANEXO – 3: Análises Estatísticas da Precipitação no Sahel-Oeste (15°W) | 118 |

Lista de Figuras e das Tabelas

Lista das Figuras

Pág.

| | |
|--|----|
| Figura 2.1.1: Limites do Sahel | 7 |
| Figura 2.1.2: Região de estudo – Sahel (CILSS) | 8 |
| Figura 2.1.3: Zonas bioclimáticas do Sahel em função da pluviometria | 9 |
| Figura 2.2.1.1.1: Sistema Mundial de Observações | 10 |
| Figura 2.2.1.1.2: Sistema de assimilação de "p" variáveis em 17 níveis de pressão do NCEP/NCAR | 11 |
| Figura 2.2.1.2.1: Configuração espacial da rede, escala regional - Rede AGRHYMET: Rede operacional do ano 2000 composta de 680 postos pluviométricos e de 87 estações sinópticas | 12 |
| Figura 2.2.1.2.2: Rede óptimal do C.R. AGRHYMET (pontos de grelha, malha de 1° x 1°) | 13 |
| Figura 3.1.1.1: Características da Monção Oeste Africana | 19 |
| Figura 3.1.1.2: Contrastes térmicos entre o Oceano e o Continente; no Inverno e Verão do HN | 19 |
| Figura 3.1.3.2.1. (a) – Diagrama latitude-tempo de precipitação diária (mm/dia) entre 1 de Março e 30 de Novembro; (c) Composite entre 1968 e 1990 a volta da data do "salto" do ZCIT | 20 |
| Figura 3.1.4.1: Escalas da monção oeste africana (MOA) | 21 |
| Figura 3.1.5.1: Dispositivos para as observações especiais – SOP | 23 |
| Figura 3.1.5.2: Dispositivos para as observações da MOA de longo prazo – LOP | 25 |
| Figura 3.1.5.3: Dispositivos para as observações reforçadas da MOA - EOP | 26 |
| Figura 3.1.6.1: Ciclo anual da média de precipitações do período 1979-1996, baseado nas estimativas de precipitações segundo Xie e Arkin (1997) | 26 |
| Figura 3.1.7.1: Região da Monção Oeste Africana e os Mecanismos Associados | 27 |
| Figura 3.1.7.2.1: Campo de pressão média à superfície em Janeiro e em Julho | 28 |
| Figura 3.1.7.3.1: Linhas de borrascas na África Ocidental; Imagem MeteosatIR10.8; Out. de 2006 ... | 30 |
| Figura 3.1.8.1: Dinâmica da Monção Oeste Africana à superfície | 33 |
| Figura 3.1.8.2: Vento zonal aos 600hPa | 33 |
| Figura 3.1.7.3: Vento Zonal aos 200hPa | 33 |
| Figura 3.3.1.a.1: Balanço de energia à superfície (W/m^2), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 37 |
| Figura 3.3.1.a.2: Balanço de energia à superfície (W/m^2), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 37 |
| Figura 3.3.1.a.3: Balanço de energia à superfície (W/m^2), no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 37 |
| Figura 3.3.1.b.1: Fluxo de Radiação Resultante de Pequenos Comprimentos de Ondas (W/m^2), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 38 |
| Figura 3.3.1.b.2: Fluxo de Radiação Resultante de Pequenos Comprimentos de Ondas (W/m^2), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 39 |
| Figura 3.3.1.b.3: Fluxo de Radiação Resultante de Pequenos Comprimentos de Ondas (W/m^2), no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 39 |
| Figura 3.3.1.c.1: Fluxo de Radiação Resultante de Grandes Comprimentos de Ondas (W/m^2), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 40 |
| Figura 3.3.1.c.2: Fluxo de Radiação Resultante de Grandes Comprimentos de Ondas (W/m^2), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994 | 40 |
| Figura 3.3.1.c.3: Fluxo de Radiação Resultante de Grandes Comprimentos de Ondas (W/m^2), no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 41 |
| Figura 3.3.1.d.1: Fluxo do Calor Latente (W/m^2), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 42 |
| Figura 3.3.1.d.2: Fluxo do Calor Latente (W/m^2), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.3.1.d.3: Fluxo do Calor Latente (W/m^2), no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 43 |
| Figura 3.3.1.e.1: Fluxo de Calor Sensível (W/m^2) no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 44 |
| Figura 3.3.1.e.2: Fluxo de Calor Sensível (W/m^2) na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 44 |
| Figura 3.3.1.e.3: Fluxo de Calor Sensível (W/m^2) no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 44 |
| Figura 3.3.1.f.1 Fluxo Meridional de Energia Estática Húmida (W/Kg) no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente. | 46 |
| Figura 3.3.1.f.2: Fluxo Meridional de Energia Estática Húmida (W/Kg) na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 47 |
| Figura 3.3.1.f.3: Fluxo Meridional de Energia Estática Húmida (W/Kg) no fim da monção (15 de Agosto a 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 47 |
| Figura 3.3.1.g.1: Perfis Verticais Médios da Divergência do Fluxo da Energia Estática Húmida; Sahel-Oeste e Sahel-Este, 15 Maio - 15 Julho 1984 e 1994 | 48 |
| Figura 3.3.1.g.2: Perfis Verticais Médios da Divergência do Fluxo da Energia Estática Húmida; Sahel-Oeste e Sahel-Este, 15 Julho - 15 Agosto 1984 e 1994 | 48 |
| Figura 3.3.1.g.3: Perfis Verticais Médios da Divergência do Fluxo da Energia Estática Húmida; Sahel-Oeste e Sahel-Este, 15 Agosto - 15 Setembro 1984 e 1994 | 48 |
| Figura 3.3.2.a.1: Diferença de valores da pressão ao nível médio do mar (hPa), 1994-1984: a) início da monção, b) intensificação da monção e c) fim da monção | 50 |
| Figura 3.3.2.b.1.1: Campo do vento e geopotencial aos 925hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 51 |
| Figura 3.3.2.b.1.2: Campo do vento e geopotencial aos 925hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 51 |
| Figura 3.3.2.b.1.3: Campo do vento e geopotencial aos 925hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 52 |
| Figura 3.3.2.b.2.1: Campo do vento e geopotencial aos 850hPa, no início da monção (15 de Maio à 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 52 |
| Figura 3.3.2.b.2.2: Campo do vento e geopotencial aos 850hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 53 |
| Figura 3.3.2.b.2.3: Campo do vento e geopotencial aos 850hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 53 |
| Figura 3.3.2.b.3.1: Campo do vento e geopotencial aos 600hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 54 |
| Figura 3.3.2.b.3.2: Campo do vento e geopotencial aos 600hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 54 |
| Figura 3.3.2.b.3.3: Campo do vento e geopotencial à 600 hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 54 |
| Figura 3.3.2.b.4.1: Campo do vento e geopotencial aos 200hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 56 |
| Figura 3.3.2.b.4.2: Campo do vento e geopotencial aos 200hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 56 |
| Figura 3.3.2.b.4.3: Campo do vento e geopotencial aos 200hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 56 |
| Figura 3.3.2.c.1: Perfis Médio da Velocidade Vertical do Vento - Ómega(Pa/s) no Sahel-Oeste e Sahel-Este, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 57 |
| Figura 3.3.2.c.2: Perfis Médio da Velocidade Vertical do Vento - Ómega(Pa/s) no Sahel-Oeste e Sahel-Este, na intensificação da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 58 |
| Figura 3.3.2.c.3: Perfis Médio da Velocidade Vertical do Vento - Ómega(Pa/s) no Sahel-Oeste e Sahel-Este, no fim da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 58 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.3.2.d.1.1: Cisalhamento do vento (200-500hPa), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 59 |
| Figura 3.3.2.d.1.2: Cisalhamento do vento (200-500hPa), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 59 |
| Figura 3.3.2.d.1.3: Cisalhamento do vento (200-500hPa), no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 60 |
| Figura 3.3.2.d.2.1: Cisalhamento do vento (700-925hPa), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 60 |
| Figura 3.3.2.d.2.2: Cisalhamento do vento (700-925hPa), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 61 |
| Figura 3.3.2.d.2.3: Cisalhamento do vento (700-925hPa), no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 61 |
| Figura 3.3.3.a.1: Temperatura do ar aos 850hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 62 |
| Figura 3.3.3.a.2: Temperatura do ar aos 850hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 62 |
| Figura 3.3.3.a.3: Temperatura do ar aos 850hPa, no fim da monção (15 de Agosto à 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 63 |
| Figura 3.3.3.b.1: Diferença de valores da temperatura da superfície da água do mar, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 63 |
| Figura 3.3.3.b.2: Diferença de valores da temperatura da superfície da água do mar, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 64 |
| Figura 3.3.3.b.3: Diferença de valores da temperatura da superfície da água do mar, no enfraquecimento da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.. | 64 |
| Figura 3.3.3.c.1: Humidade relativa do ar aos 850hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente | 65 |
| Figura 3.3.3.c.2: Humidade relativa do ar aos 850hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente | 65 |
| Figura 3.3.3.c.3: Humidade relativa do ar aos 850hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente | 66 |
| Figura 3.3.3.d.1: Diferença dos Índices da Água Precipitada (Kg/m^2), 1994-1984: a) início da monção, b) intensificação da monção e c) fim da monção | 66 |
| Figura 4.1.1: Média diária de precipitações (em mm), no período de 1968-1990 para cada ponto da grelha a partir do ficheiro de observação do IRD | 69 |
| Figura 4.1.2: Deslocamento das isoietas entre os dois períodos antes e depois de 1968 | 70 |
| Figura 4.1.3: Índice de precipitação anual no Sahel (1950-2004) | 73 |
| Figura 4.2.1: Análise da tendência de índice de precipitação, média mensal, Maio à Outubro, 1960-2000; a) Sahel-Oeste e b) Sahel-Este | 74 |
| Figura 4.2.2.1: Índices de precipitação, média anual; a) Sahel-Oeste e b) Sahel-Este | 74 |
| Figura 4.2.3.1: Boxplot da Precipitação Média Mensal, 1960-2000; Sahel-Oeste | 75 |
| Figura 4.2.3.2: Frequência da Precipitação Anual, 1960-2000; Sahel-Oeste | 75 |
| Figura 4.2.3.3: Boxplot da Precipitação Média Mensal, 1960-2000; Sahel-Este | 76 |
| Figura 4.2.3.4: Frequência da Precipitação Anual, 1960-200; Sahel-Este | 76 |
| Figura 4.2.4.1: Análise da sazonalidade (contribuição de variabilidade mensal) para Sahel-Oeste | 77 |
| Figura 4.2.4.2: Análise da tendência geral e da sazonalidade - Sahel-Oeste | 77 |
| Figura 4.2.4.3: Análise da sazonalidade (contribuição e variabilidade mensal); Sahel-Este | 78 |
| Figura 4.2.4.4: Análise da tendência geral e da sazonalidade; Sahel-Este | 78 |
| Figura 4.2.5.1: Variabilidade da Precipitação Anual; a) Sahel-Oeste e b) Sahel-Este | 78 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.2.6.1: Espectro de frequência de precipitação anual (1960-2000): a) Sahel-Oeste e b) Sahel-Este | 78 |
| Figura 4.3.1.1: Previsão Sazonal da Precipitação para África Ocidental; Período de Julho, Agosto e Setembro de 2006 | 81 |
| Figura 4.3.2.1.1: Validação do Modelo CPT - CCA: Predictor – U850 (Março, Abril e Maio) e Predictando – Índice de Precipitação no Sahel (Julho, Agosto e Setembro), 1961-2000 | 82 |
| Figura 4.3.2.1.2: Validação do Modelo CPT - CCA: Predictor – SST (Maio) e Predictando – Índice de Precipitação no Sahel (Julho, Agosto e Setembro), 1961-2000 | 83 |
| Figura 4.3.2.2.1: Validação do Modelo CPT - PCR: Predictor – U850 (Março, Abril e Maio) e Predictando – Índice de Precipitação no Sahel (Julho, Agosto e Setembro), 1961-2000 | 83 |
| Figura 4.3.2.2.2: Validação do Modelo CPT - PCR: Predictor – SST (Maio) e Predictando – Índice de Precipitação no Sahel (Julho, Agosto e Setembro), 1961-2000 | 84 |
| Figura 5.1: Crescimento heterogéneo do milho por falta da água | 87 |
| Figura 5.2.1: Desaparecimento do Lago Tchad | 91 |
| Figura 5.2.2: Degradação dos solos na África Ocidental (Fonte ISNAR) | 93 |

Lista das Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 4.6.1: Frequência e período da precipitação anual, para Sahel-Oeste e Sahel-Este | 79 |
| Tabela 5.1.1: Crescimento Demográfico na Zona Saheliana | 88 |
| Tabela 5.1.2: Comparação de taxas de crescimento demográfico;1980-1992 | 88 |
| Tabela 5.1.3: Taxa de Urbanização na Zona Saheliana | 89 |
| Tabela 5.1.4: Estimativas da evolução da população nos países do Sahel | 90 |
| Tabela 5.1.5: Tendência demográfica nos países do CILSS | 90 |
| Tabela 5.2.1: Percentagem das terras degradadas em alguns países do Sahel | 93 |

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

1.1. Contexto e Motivações

Desde início dos anos setenta, o regime pluviométrico associado à Monção Oeste Africana (MOA) foi profundamente perturbado. As secas dos anos setenta e oitenta generalizaram-se na África Ocidental, com um deficit médio de precipitação que oscila entre 15 à 35%, entre os decénios húmidos antes de 1970 e os decénios secos que seguiram depois. Durante os últimos decénios as condições climáticas melhoraram no sul da região, mas o deficit pluviométrico persiste na região Oeste do Sahel.

Várias tentativas de explicações das causas destes deficits pluviométricos mostram a complexidade do fenómeno e o papel preponderante da dinâmica da monção oeste africana sobre a variabilidade de precipitações no Sahel.

O funcionamento da dinâmica dos ecossistemas sahelianas são particularmente afectadas pelas flutuações climáticas, principalmente pela precipitação, observada à diferentes escalas temporais: sazonal, interanual e decenal.

Tendo em conta os impactos importantes desta variabilidade climática à escala regional sobre as actividades humanas, é fundamental compreender os mecanismos físicos desta variabilidade de maneira a melhorar as previsões sazonais. Actualmente os esforços estão a ser envidados na compreensão desta variabilidade climática e já se identificou o enfraquecimento da monção oeste africana (MOA) como um dos factores climáticos interveniente no processo. Dado a complexidade das interacções entre a atmosfera, a biosfera e a hidrosfera que controlam a dinâmica da monção oeste africana e o ciclo de vida de sistemas pluviométricos, ainda é difícil de avaliar esta variabilidade climática que assola o Sahel. Estudos recentes baseados na modelização mostraram que os oceanos (Sesazzi et al., 1996), a vegetação (Zheng e Eltahir, 1998; Wang e Eltahir, 2000) e a topografia (Semazzi e Sun, 1997) têm um papel importante no estabelecimento da circulação da monção na África Ocidental.

A dinâmica atmosférica é um factor importante de controlo da pluviometria. No entanto, o comportamento humano ligado à actividade económica à grande escala, pode também ter uma influência significativa. Charney (1975) tinha sublinhado que uma exploração abusiva de solos originavam um aumento do albedo no Sahel com impacto directo sobre a circulação do Hadley. Zheng e Eltahir (1998) insistem sobre o facto que uma diminuição importante da cobertura vegetal sobre a região Sudano-Guinéense pode ter uma influência sobre as precipitações desta região.

A monção oeste africana é a fonte vital de precipitações na região do Sahel. Mas, igualmente, desempenha um papel importante na escala global. A África Ocidental é com efeito uma das principais fontes de calor à escala continental e influencia sobremaneira a circulação atmosférica planetária.

A África Ocidental foi atingida por uma seca de amplitude e de uma duração sem precedente ao longo da segunda metade do Século XX. Na origem desta crise maior, esteve as perturbações da monção oeste africana. Este fenómeno é reversível? Tem causas regionais ou prefigura as modificações profundas do sistema climático mundial?

Para responder estas questões e compreender as razões, que até aqui são ainda, relativamente, mal conhecidas, das perturbações da monção oeste africana, é que motivou nos últimos anos, os Científicos do Norte e do Sul a trabalhar em torno do Programa Internacional de Análise Multidisciplinar da Monção Africana (AMMA), em curso de implementação, com uma forte implicação dos Científicos Africanos. Na verdade, as respostas só podem ser dadas quando os modelos climáticos forem mais fiáveis. No entanto para poder diagnosticar as causas destas mudanças, seria indispensável conhecer os sintomas e então precisar onde, quando e como é que se manifestam (Tapsoba, 1997).

O Programa AMMA cuja missão é o estudo da variabilidade da Monção Africana à escalas do tempo sazonal e interanual, assim como os seus impactos sobre as populações e sobre os ecossistemas, fixa como uma das suas prioridades – contribuir na melhoria das previsões meteorológicas, climatológicas e as assimilações do clima ao longo prazo.

A variabilidade inter-anual e inter-decenal da monção oeste africana é bem documentada e tem motivado muitos esforços de pesquisas nos decénios recentes.

Os pesquisadores do IRD (*Institut du Recherche et Développement*) mostraram recentemente que a Monção Africana não é um processo que evolui continuamente de Sul para Norte. Existe com efeito duas dinâmicas distintas no tempo e no espaço – um regime oceânico e um regime continental – separados por "um salto". A primeira fase da monção corresponde a um regime oceânico. Ela começa em Fevereiro na costa do Golfo da Guiné depois propaga-se regularmente para o Norte e atinge em Maio o Sahel Central (13°N, latitude de Niamey). Após um período de estabilização, produz-se uma brutal intensificação de precipitações em todo o Sahel. Esta fase continental apresenta uma forte variabilidade interanual e é o seu enfraquecimento que tem causado a grande seca, nomeadamente no Sahel onde 90% de precipitação lhe é associada. A compreensão das causas deste enfraquecimento constitui um desafio importante para o Programa AMMA.

O espaço Saheliano pelas suas características, nomeadamente constituído de ecossistemas frágeis, é um meio sujeito a riscos (Charles TOUPET, 1995). O impacto das crises é devido a conjunção de vários factores naturais e antropogénicos: deficits pluviométricos sem precedentes, sobrecarga das manadas, explosão demográfica, choque da modernidade que induz a um sedentarismo forçado das populações nómadas e uma urbanização selvagem (Bangura D., et al., 2005).

Para minimizar esta crise é necessário implementar uma política de investigação sobre o clima e a gestão de água, através de uma compreensão explícita dos processos e mecanismos associados a MOA; sobre o restauro do coberto vegetal; e sobre o controlo do aumento demográfico e luta contra a pobreza.

O Sahel conheceu nos últimos anos um forte crescimento demográfico. A satisfação das necessidades vitais da sua população (em água potável, em produtos agrícolas, em energia, etc.) impõe uma gestão de mais a mais rigorosa dos seus recursos em água. É preciso poder definir quais são os cenários pluviométricos previstos daqui aos 10, 20 anos, ou mais, conforme as projecções, e deduzir um inventário prospectivo dos recursos a gerir (Tapsoba et al., 2004). Vários estudos mostram que não é possível de considerar como estacionário os climas da África Ocidental, aliás como a mostra os trabalhos (Hubert et Carbonnel, 1987; Hubert et al., 1989; Snijders, 1986; Musy e Meylan, 1987; Demaree e Nicolis, 1990; Carbonnel e Hubert, 1992). Os climas do passado não são predictores eficazes dos climas do futuro; mas são indispensáveis para situarmos o estado actual do clima presente, com vista a balizar os cenários da evolução futura do clima.

O Sahel e quase totalidade do Continente Africano foram palco de secas contínuas, desde da segunda metade do século XX, cujas consequências foram catastróficas sobre as populações, seus recursos alimentares e as suas economias (Folland et al., 1986; Fontaine e Janicot, 1993). A distribuição de precipitações anuais se concentra a mais de 80% num intervalo de tempo muito curto, entre Junho à Setembro, o que impõe uma limitação hídrica forte às culturas das regiões Sahelianas e uma extrema sensibilidade dos rendimentos agrícolas às flutuações da monção oeste africana à diferentes escalas espaciais e temporais.

É neste contexto de impactos socio-económicos sobre as populações e sobre os ecossistemas que tornou-se essencial a Comunidade Científica de descrever e de compreender a dinâmica intrínseca à Monção Oeste Africana através de experiências de terreno de grande envergadura como GATE (1974) e WAMEX (1979) e um esforço importante na pesquisa diagnóstico e numérico. A dinâmica da monção oeste africana foi assim descrita na literatura a diferentes escalas espaciais e temporais:

- À escalas interanuais e decenais, foi mostrado que a variabilidade da precipitação de monção no Sahel é caracterizada por uma forte correlação espacial, entre a posição e a intensidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e também foi evidenciado o papel importante desempenhado pelas temperaturas de superfície dos oceanos Atlântico e Pacífico, e as condições de superfícies continentais, tais como o albedo, a humidade do solo e a vegetação (Folland et al., 1986; Ward 1998; Janicot et al., 2001). A intensidade do gradiente meridional de entropia (ou de sistemas de meso-escala) parece ter um papel fundamental na variabilidade da Monção Africana. Visto que os eventos pluviosos estão directamente associados aos Sistemas Convectivos de Meso-Escala (SCME), estas observações permitem de se perguntar como é que as propriedades dos SCME (ciclo de vida, direcção de propagação, distribuição espacial) podem ser ligados à variabilidade de baixas frequências. Os resultados recentes sobre ciclos diurnos médios e sobre os ciclos sazonais médios da SCME na África Ocidental (Hodges e Thorncroft, 1997; Mathon e Laurent, 2001), devem permitir de orientar as futuras pesquisas.

Finalmente nota-se que os fenómenos convectivos exercem uma retroacção a grande escala porque modificam os gradientes horizontais de temperatura (massa) e os gradientes energéticos. Estes gradientes determinam por sua vez a intensidade da circulação de monção.

O estudo destas interações precisa de uma compreensão da dinâmica do ciclo de água sobre o Continente Africano. A variabilidade dos sistemas convectivos e de precipitações associadas jogam um papel fundamental sobre esta dinâmica, que por sua vez, retroage com a atmosfera e com as condições de superfície. Estas condições são os factores-chaves que forçam a monção africana. Elas são marcadas por uma forte variação inter-anual (temperatura de superfície do oceano, ciclo sazonal do ciclo vegetativo) e das tendências à longo prazo (degradação do coberto vegetal, aquecimento do oceano tropical sul).

- Às escalas convectivas e sinóticas, são dominados por carácter intermitente no espaço e no tempo criado pelas perturbações pluviosas de origem dinâmica, as Ondas de Leste (Duvel 1990; Diedhiou 1998) e pelos sistemas de meso-escalas (Mathon e Laurent 2001) para modular a pluviometria às escalas do tempo inferior à 10 dias.

A circulação meridional advecta o ar húmido na camada da monção a partir do Golfo da Guiné. O ar mais seco é advectado, na troposfera média em proveniência do Sahara. O conflito e a mistura destas duas massas do ar têm lugar principalmente nas camadas baixas perto da frente intertropical (FIT) e na troposfera média perto da zona de convergência intertropical (ZCIT). Resultam gradientes meridionais da vorticidade potencial, uma condição necessária para o desenvolvimento das Ondas de Este, graças a instabilidade barotrópica (Burpee, 1972; Reed e al, 1977; Thorncroft, 1995). O gradiente positivo da temperatura potencial nas camadas baixas interage com o gradiente negativo do turbilhão potencial na troposfera média, produzindo uma fonte de instabilidade baroclínica (Thorncroft e Blackburn, 1999). As Ondas de Leste assim criadas ao longo do JEA (com um período de ~3-5 dias e um comprimento de onda horizontal de ~3000 Km) interagem com os sistemas convectivos de meso-escala. Ao Norte do JEA um outro tipo de Ondas de Este (período de ~6-9 dias e comprimento de onda horizontal de ~6000 Km) modula de maneira intermitente a convecção húmida (Diedhiou et al., 1999). O desenvolvimento de certos caracteres de tipo sinótico ao nível do JET é ainda mal compreendido.

No entanto entre estas duas escalas do tempo, interanual e sinótica, a variabilidade pluviométrica é mal conhecida apesar do impacto maior sobre a estratégia agrícola no Sahel (B. Sultan, 2002).

1.2. Objectivos

O presente trabalho fixa por objectivos científicos: i) estudar os aspectos dinâmicos e termodinâmicos do fluxo da Monção Oeste Africana (MOA), descrevendo os comportamentos dos parâmetros meteorológicos nas diferentes fases da monção (início da monção, fase de intensificação e de enfraquecimento da monção), em dois anos de referência: 1984 (ano seco) e 1994 (ano chuvoso) no Sahel; ii) analisar a tendência e a variabilidade da precipitação sazonal no Sahel, e iii) iniciar um estudo diagnóstico que visa contribuir, no âmbito do Programa AMMA, na compreensão e na elucidação dos processos implicados na dinâmica da MOA e na variabilidade de precipitação sazonal no SAHEL, os seus impactos sobre as populações e sobre os ecossistemas.

1.3. Organização da dissertação

Além do capítulo introdutório, o presente trabalho articula-se da seguinte forma:

- O Capítulo II apresenta a região de estudo (Sahel), dados e metodologia aplicada;
- O Capítulo III descreve os fundamentos teóricos da dinâmica da monção oeste africana, constatações e apresenta um estudo diagnóstico;
- O Capítulo IV apresenta análises estatísticas da variabilidade sazonal de precipitação no Sahel e a utilização das previsões sazonais – Modelo CPT;
- O Capítulo V versa sobre os impactos da dinâmica da monção oeste africana e a variabilidade das precipitações sazonais no Sahel, sobre as populações e sobre os ecossistemas; e
- O Capítulo VI apresenta as conclusões gerais, sugestões e perspectivas futuras, seguido de referências bibliográficas e anexos.

CAPÍTULO II: REGIÃO DE ESTUDO, DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo, na primeira secção, apresenta-se a região de estudo – o SAHEL, os seus aspectos geográfico, físico-climatológico e na segunda secção apresenta-se os meios (dados e a metodologia) aplicados nesta abordagem diagnostica proferida sobre a "dinâmica da monção oeste africana e a variabilidade de precipitações sazonais no Sahel; impactos sobre as populações e sobre os ecossistemas".

2.1. REGIÃO DE ESTUDO – O SAHEL

O SAHEL (do Árabe ساحل *sahil*, que significa "costa" ou "fronteira") é a região de África situada entre o deserto do SAHARA e as terras mais férteis ao Sul. Uma costa onde a ecologia e o clima faz renascer a vida, após a travessia de milhares de quilómetros do deserto de SAHARA que se estende ao Sul dos países do Magreb.

Normalmente, incluem-se no Sahel o Arquipélago de Cabo-Verde, o Senegal, a Mauritânia, o Mali, o Burkina-Faso, o Níger, a parte norte da Nigéria, o Tchad, o Sudão, a Etiópia, a Eritreia, o Djibouti e a Somália (Figura 2.1.1). Por vezes, usa-se este termo para designar os países da África Ocidental ameaçados pelos efeitos da seca e desertificação, entre eles a Guiné-Bissau e Cabo-Verde.

O termo foi cunhado para designar uma região fito-geográfica, dominada por vegetação de savana, que recebe uma precipitação média anual entre 150 mm à 500 mm. Pode, portanto, pensar-se que a agricultura no Sahel está condenada ao fracasso mas, ao contrário, ela é protegida por uma cintura verde constituída por uma flora altamente diversificada, que – se não ter sido usada pelo homem – a protege dos ventos do Sahara.

Hoje em dia, o termo "Sahel" aplica-se mais a uma zona agro-climática do que para uma entidade "geopolítica", porque a zona travessa um certo número de Estados vulgarmente chamados "sahelianos", que se reagrupam no seio duma organização sub-regional: Comité Inter-estados de Luta contra a Seca no Sahel (CILSS).

O clima no Sahel é caracterizado por alternância, durante o ano, de uma época chuvosa (de Junho à Outubro) e uma época seca (de Novembro à Maio).

As principais características desta região são:

- Fortes variabilidades climáticas, caracterizadas por irregularidade da pluviometria, variando de 150mm à 2500mm;
- Predominância de agricultura e pecuária (criação de gado); mais de metade da população activa trabalham nestes subsectores que contribuem com aproximadamente 40% do PIB;

- Forte crescimento demográfico, da ordem de 2,8% por ano, e uma urbanização muito rápida e selvagem, cuja taxa de crescimento anual se estima a volta de 7%.

O Sahel tem sido palco de longos períodos de seca que, por exemplo, em 1968 – 1974 levaram a uma situação de fome nos países da região. Estas secas motivaram o esforço da Comunidade Internacional em criar o Fundo Internacional de Desenvolvimento Agrícola, uma Agência das Nações Unidas, e também o CILSS, pelos Chefes de Estados e dos Governos dos países da região.

Neste estudo, o termo Sahel aplica-se a porção da África Ocidental formada pelos nove (9) países do CILSS que são: Cabo-Verde, Burkina-Faso, Gambia, Guiné-Bissau, Mali, Mauritânia, Níger, Senegal e Tchad.

O espaço que vai de Cabo-Verde à Tchad cobre uma superfície de 5,4 milhões de Km² e conta com uma população superior à 50.000.000 de habitantes.

É uma das zonas do mundo a mais vulnerável às alterações do clima (Relatório do GIEC). Os principais factores da sua vulnerabilidade as alterações climáticas são: uma pobreza generalizada; ecossistemas fragilizadas pelas secas cíclicas e uma forte pressão demográfica; uma grande sensibilidade e dependência de principais sectores económicos (agricultura e pecuária) do clima.

A cintura saheliana estende-se ao sul do Sahara; do Atlântico ao mar vermelho, aproximadamente 6.000 Km de comprimento e somente 400 à 600Km de largura (figura 2.1.1). Esta cintura atravessa 10 países entre os mais pobres do mundo e abriga cerca de 50 milhões de pessoas cuja maioria pratica uma agricultura de subsistência. O crescimento demográfico é muito elevado, da ordem de 2 à 4% por ano. Desde 50 anos, as superfícies cultivadas têm aumentado nas proporções similares na parte sul do Sahel, em detrimento das superfícies naturais destinadas a pastagens.



Figura 2.1.1: Limites do Sahel (Fonte - H.G. Mensching, *Desertification*. Darmstadt, 1990).

A nossa zona de estudo é uma parte do Sahel (figura 2.1.2), que reagrupa os países do CILSS, numa banda compreendida entre [10.5°N-16.5°N de latitude] e [17°W-22°E de longitude]. Esquemáticamente, trata-se de uma zona compreendida, na distribuição latitudinal dos regimes climáticos, entre as isoietas 200mm e 1100mm. Segundo os estudos do Courel (1984), no interior deste vasto conjunto, a partir dos critérios climatológicos, pluviométricos, fito-geográficos e geomorfológicos permitem distinguir domínios bioclimáticos relativamente homogêneos, sobretudo em função da pluviometria (figura 2.1.3). No que concerne a distribuição do coberto vegetal, pode-se distinguir segundo o Guinko (1984) principalmente três zonas fito-geográficas: a zona saheliana, a zona sudanesa e a zona pré-guinéense.

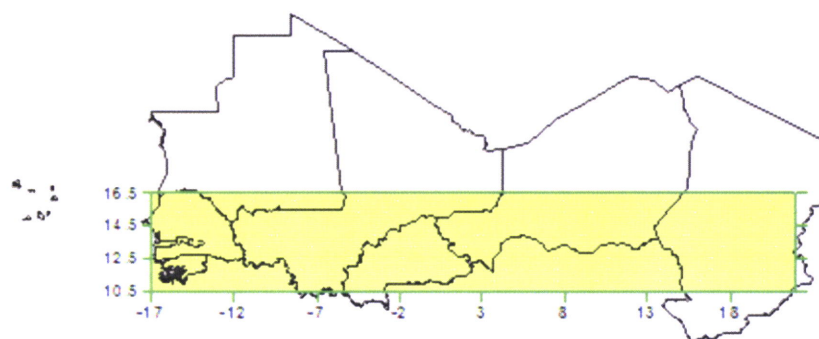


Figura 2.1.2: Região de estudo – Sahel (CILSS)

O Sahel é afectado durante os meses do Verão do Hemisfério Norte por um sistema de monção proveniente do Atlântico. As precipitações estão concentradas nos meses de Julho, Agosto e Setembro. Na parte Norte elas podem durar só 2 meses ao ano e na parte Sul são geralmente mais longo e podem durar até 5 meses. A sazonalidade da monção é regular, mas a distribuição espacial e temporal de precipitações é fortemente irregular e imprevisível. A época seca é caracterizada pela fraca humidade na atmosfera acompanhada de temperaturas elevadas. O papel da superfície continental, em particular da vegetação, neste fenómeno deixa interrogações maiores (Carney e Stone, 1974). Depois das secas dos anos 70 e 80, o regresso das condições próximas do normal estão ainda por explicar e a questão que se põe tem haver nomeadamente com a influência de alterações dos parâmetros meteorológicos (CO₂, radiação global, Temperatura, Vento, etc.) sobre esta tendência (Wang e Altahir, 2002; Nemani et al., 2003).

O Sahel é sob influência do clima árido e semi-árido; enquadrado pelo domínio do deserto do SAHARA a Norte e as savanas sudanesa ao Sul. O Sahel é geralmente definido pelas isoietas 100 e 600 mm/ano (Le Houérou, 1989).

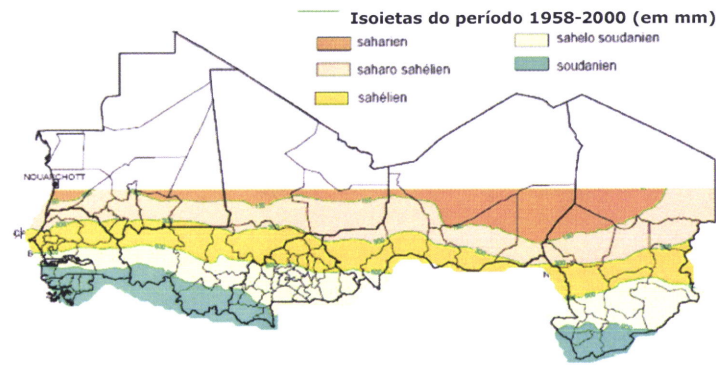


Figura 2.1.3: Zonas bioclimáticas do Sahel em função da pluviometria (Some B., 2000); (Fonte: André NONGUIERMA et Antoine ROYER, 2004)

Sempre definido como uma entidade, o Sahel apresenta situações contrastes entre a sua parte setentrional (com precipitação < 300 mm por ano) com a vocação pastoral e a sua parte Sul (com precipitação > 300 mm por ano) onde a pressão demográfica impõe importantes mudanças no modo da ocupação dos solos e gestão das terras.

2.2. DADOS E METODOLOGIA

2.2.1. DADOS

Os dados do projecto Reanálises do "National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research" (NCEP/NCAR) (Kalnay, 1996) possibilitaram este estudo diagnóstico, uma vez que seria extremamente complexo, até mesmo impossível, por falta de dados de observações regulares quer a superfície como em altitude, no espaço e no tempo sobre a região do estudo. Também neste estudo usaram-se os dados observados de precipitações da região do Sahel, interpolados nos pontos de grelhas fornecidos pelo Centro Regional AGRHYMET (CRA) de Niamey-Niger.

2.2.1.1. Dados de Reanálises do NCEP/NCAR

Os dados de reanálise utilizados são classificados em três componentes: energética, dinâmica e higrométrica.

a) Componente Energética

- Fluxo de Radiação Resultante de Grande Comprimento de Onda;
- Fluxo de Radiação Resultante de Pequeno Comprimento de Onda.
- Balanço de energia na superfície;
- Fluxo de calor latente;
- Fluxo de calor sensível
- Energia estática húmida em 925hPa e 850hPa;

b) Componente Dinâmica

- Pressão ao nível médio do mar (Diferença dos valores entre 1994 e 1984);
- Vento e a Altura Geopotencial aos 925, 850, 600 e 200hPa;

- Cisalhamento vertical do vento (200-500hPa) e (700-925hPa);
- Ómega (Perfis Médio da Velocidade Vertical, para Sahel-Oeste [10.5°N-16.6°N de Latitude; 17°W-0° de Longitude] e Sahel-Este [10.5°N-16.5°N de Latitude e 0°-22°E de Longitude]).

c) Componente Hidrométrica (Temperatura – Humidade – Precipitação)

- Temperatura do ar aos 850hPa;
- Humidade relativa do ar aos 850hPa;
- Precipitação (Diferença dos valores do conteúdo da água precipitável, 1994-1984)
- Anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (SST- *Sea Surface Temperature*) para 1984 e 1994.

Estes dados provêm de um sistema de assimilação de bases de dados de diferentes fontes (navios, aviões, bóias, satélites, radiosondagens, ... como mostra a figura 2.2.1.1.1), e com a utilização do modelo atmosférico do NCEP permite obter os campos atmosféricos completos, coerentes entre eles, repartidos nos pontos de grelha à escala global, à superfície como à diferentes níveis de pressão, a partir de 1948 até a data presente

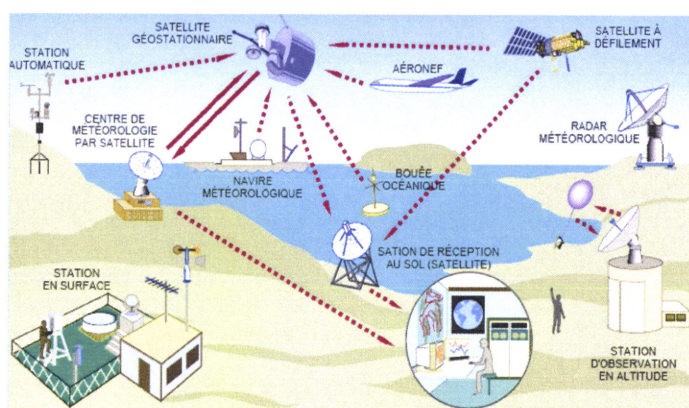


Figura 2.2.1.1.1: Sistema Mundial de Observações

(Fonte: WMO, 2004)

(Kalnay et al., 1996). Esta combinação de observações e modelação oferece em relação a uma só observação vantagens, nomeadamente, em obter uma cobertura espacial e temporal contínua à escala do globo e em estudar o clima em tempo real.

Estes campos foram classificados em 4 categorias segundo a influência relativa dos dados observados em relação ao modelo na determinação do valor da variável reanálise. As classes começam de "A", para as variáveis principalmente influenciadas pelos dados observados e que são consideradas como muito fracas, à "C" para as variáveis unicamente determinadas pelo modelo. Estes últimos devem ser utilizados com precauções para todo o diagnóstico. Mas, de maneira geral, as reanálises NCEP/NCAR são entre as mais fiáveis para a região considerada (Stendel e Arpe, 1997; Trenberth et al., 2001). A utilização desta base de dados foi também motivado pela sua acessibilidade e a sua actualização regular.

Face aos problemas de actualização dos ficheiros de dados de estações e da grande heterogeneidade de sua cobertura espaço-temporal, as reanálises constituem actualmente a solução para resolver o problema ligado a insuficiência qualitativa e quantitativa dos dados.

É preciso considerar os campos atmosféricos de reanálises como campos de observações em vez de os considerar como saídas de modelo. Só pela forma de integração de um grande número de observações, as reanálises parecem mais próximas da climatologia observada do que a climatologia do modelo (Isabelle Pocard, 2001). Por isso, oferecem uma vantagem suplementar e podem ser consideradas como uma nova fonte de investigação nas análises do clima. Nesta base de dados, 60 campos atmosféricos diferentes são

disponíveis, numa grelha regular com resolução espacial variável segundo os parâmetros ($2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ou $1.9^\circ \times 1.9^\circ$), num intervalo temporal de 6 em 6 horas.

Um estudo diagnóstico de reanálises NCEP/NCAR levado a cabo por Isabelle Pocard (2000), concluiu que o campo de precipitação provenientes dos dados de NCEP não devem ser integrados nos estudos centrados na África tropical, à escala continental como à escala regional, porque os desvios entre a observação, em termos de volumes precipitadas, do ciclo sazonal e da variabilidade interanual, são muito importantes.

O referido estudo mostrou as vantagens e as desvantagens em utilizar os dados de reanálises de NCEP/NCAR e recomendou que para levar a cabo estudo válido sobre a variabilidade interanual, convém seleccionar períodos coerentes, e para um conjunto de parâmetros, os estudos não devem melhor começar que depois de 1968, ano em que detectou-se uma ruptura na série dos dados; mas para certas regiões, as rupturas sucessivas foram igualmente registadas em diferentes parâmetros depois de 1968 (1976/77, 1983/84 e 1987/88).

A figura 2.2.1.1.2 esquematiza o sistema de assimilação dos dados de reanálises do NCEP/NCAR, segundo Kalnay et al., 1996; apresentado por Sultan B., (2002).

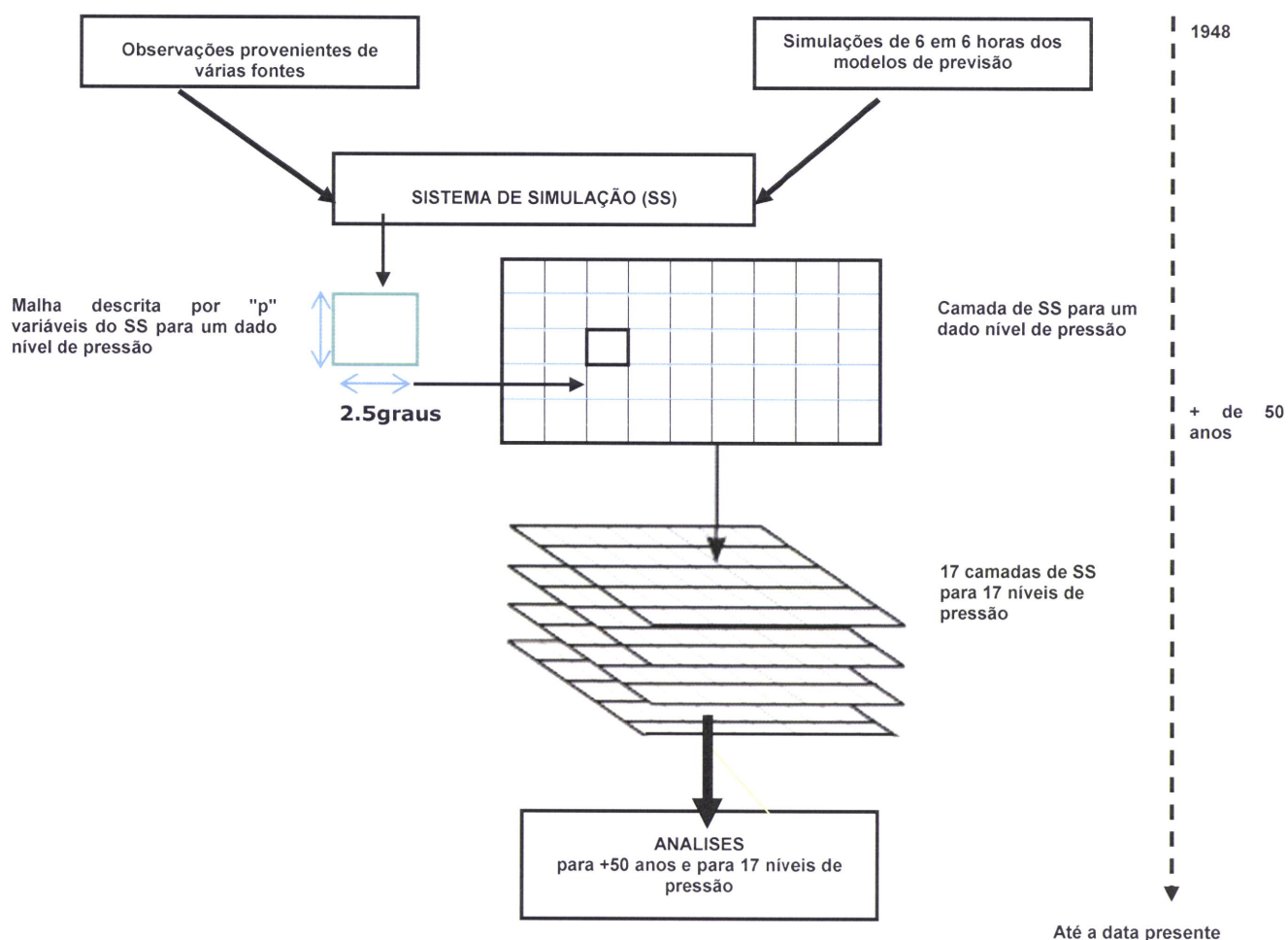


Figura 2.2.1.1.2: Sistema de assimilação de "p" variáveis em 17 níveis de pressão do NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996); (Fonte: adaptado do SULTAN B.; 2002)

2.2.1.2. Dados Observados (Precipitação no Sahel; 1960-2000)

Dados espacializados (em pontos da grelha – GRIDDED DATA) a partir dos dados de estações de superfície e postos pluviométricos da rede do Centro Regional AGRHYMET (CRA), que reagrupa os dados das redes operacionais dos países membros do Comité Inter-estados de Luta contra a Seca no Sahel (CILSS). A referida rede cobre aproximadamente 3 milhões de Km² e é constituída de quase 1.200 estações, mas só 750 em média envia os seus dados ao CRA cada ano. A figura 2.2.1.2.1, mostra a configuração desta rede.

Os jogos de dados utilizados estão contidos numa malha compreendida entre 10.5°N e 16.5°N de latitude, e entre 17.5°W e 22°E de longitude, num período de 41 anos (1960 à 2000), com as seguintes resoluções espaciais:

a) Resolução de 1° x 1°

- Valores decadais (a partir de 13^a década à 30^a década);
- Valores mensais (de Maio à Outubro); e
- Valores anuais (de 1960 à 2000).

b) Resolução de 2.5° x 2.5°

- Valores mensais (Maio à Outubro; 1960 à 2000).

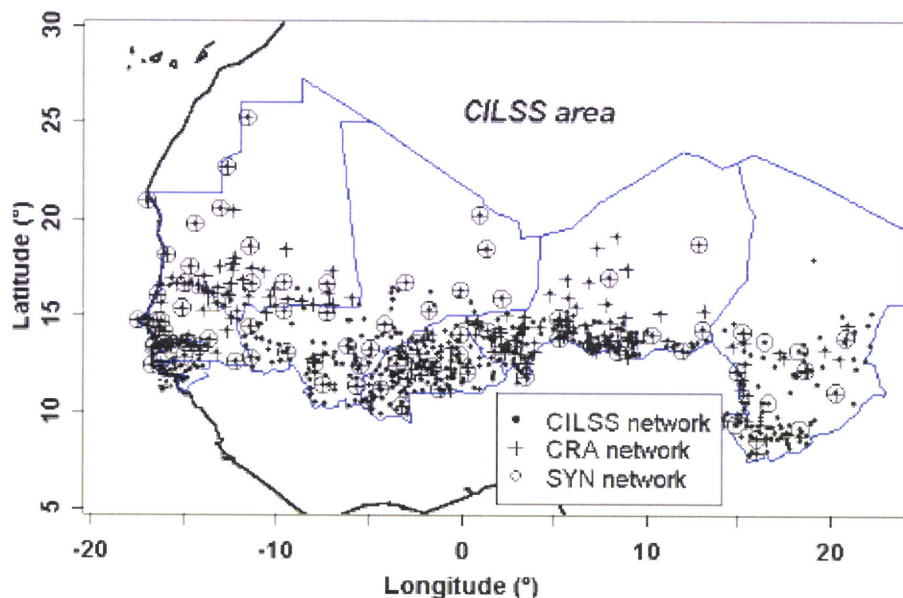


Figura 2.2.1.2.1: Configuração espacial da rede, escala regional - Rede AGRHYMET: Rede operacional do ano 2000 composta de 680 postos pluviométricos e de 87 estações sinópticas. (Fonte: Ali A. et al., 2004).

A partir da rede da figura 2.2.1.2.1 definiu-se uma rede óptimal (figura 2.2.1.2) numa malha de 1° por 1°.

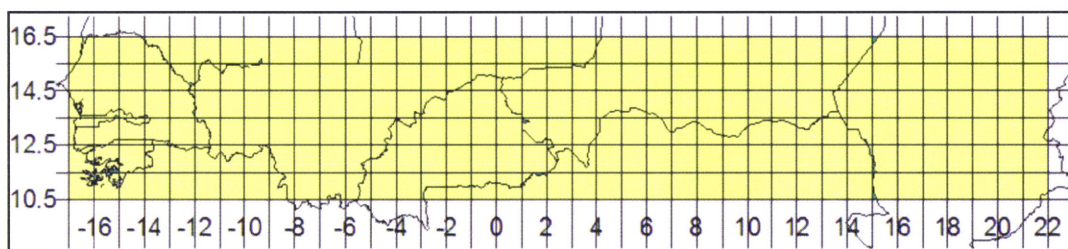


Figura 2.2.1.2.2: Rede óptimal do Centro Regional AGRHYMET (pontos de grelha, malha de 1° x 1°).

O CRA recorreu ao método de interpolação construída num quadro estocástico que permite calcular a quantidade média de precipitação num ponto da grelha e o erro provável que lhe é associado (Delhomme JP., 1976; Creutin J.D., 1979). Usou-se o método de interpolação (krigage – optimal) cujos erros teóricos foram avaliados, para resolução de 1° x 1°, de menos de 10% à escala decadal (Ali et al., 2004). Com o estudo do Ali et al., 2004, estabeleceu-se uma rede optimal para estimação de precipitação no Sahel, que compreende a malha de [17.5°W à 22.0°E em longitude e tem 3 bandas de 2.5°: a banda sul entre 10°N e 12.5°N (centro: 11.25°), a banda central, entre 12.5°N e 15°N (centro: 13.75°), a banda norte, entre 15°N e 17.5°N (centro: 16.25°)]. Logicamente, os erros médios dos produtos à superfície do CRA são mais fracos na resolução de 2.5° x 2.5° em relação aos mesmos erros para resolução de 1° x 1°. Assim os erros relativos são de 34% em média no norte do sahel (contra 52% para 1° x 1°), de 8% no centro (contra 11% para 1° x 1°), e de 10% no sul (contra 15% para 1° x 1°). Em outros termos, a rede do CRA é ótima onde é garantido um erro inferior à 10%, para estimações de cúmulos mensais abaixo de 15°N com a resolução de 2.5° x 2.5°.

Na subsecção 2.2.2 descreve-se a metodologia aplicada neste estudo diagnóstico.

2.2.2. METODOLOGIA

A área de interesse deste estudo é a banda da região do Sahel compreendida entre Latitude [10.5°N - 17.5°N] e Longitude [17°W - 22°E], considerada como zona da rede óptimal do Centro Regional AGRHYMET (figura 2.1.2).

A metodologia consiste essencialmente numa abordagem diagnostica, em avaliar o comportamento da monção oeste africana num ano deficitário em termos de precipitação e num outro ano excedentário; comparando as duas situações, para tentar compreender a influência dos diversos parâmetros meteorológicos na dinâmica da monção; análise da variabilidade sazonal de precipitação através dos métodos estatísticos e conjugar os resultados obtidos com os dados da evolução demográfica e da degradação dos ecossistemas, para ilustrar a vulnerabilidade do Sahel face aos impactos das perturbações da monção e das eventuais alterações climáticas.

Nestas análises serviu-se de assistência das funcionalidades dos softwares estatísticos, de cartografia, de visualização e de tratamento de dados e texto para ilustrar o comportamento dos parâmetros estudados durante as diferentes fases da monção oeste africana.

Os períodos considerados de ocorrência das diferentes fases da monção oeste africana são:

- Início da monção - (15 de Maio a 15 de Julho);
- Intensificação da monção (15 de Julho a 15 de Agosto); e
- Fim da monção no Sahel (15 de Agosto a 15 de Setembro).

Foram utilizados dois jogos de dados: Reanálises do NCEP/NCAR e os dados observados (precipitação do Sahel, 1960 – 2000).

- Os dados de reanálises do NCEP/NCAR:

Recorremos aos dados de reanálises do NCEP/NCAR, para construir os campos de diferentes parâmetros, com aplicação de alguns "scripts" do GrADS que permitiu a leitura dos dados e visualização sob forma de cartas e gráficos.

Todos os campos dos parâmetros utilizados neste estudo foram construídos numa malha que cobre praticamente toda a África Ocidental: Latitude de 5°S à 40°N e Longitude de 20°W à 30°E, com a excepção feita para os campos de pressão ao nível médio do mar (slp) e de anomalias de temperaturas da água do mar (SST), cujos campos foram construídos numa malha mais detalhada: Latitudes de 60°S à 60°N e as Longitudes de 40°W à 80°E, por razões óbvias e evidentes de análises.

O diagnóstico baseou-se na comparação qualitativa possível de observar nas diferentes cartas e gráficos elaborados, entre dois anos identificados em que a precipitação teve comportamentos opostos no Sahel: um ano considerado seco, em termos de precipitação, no Sahel (1984) e um ano chuvoso ou excedentário em termos de precipitação no Sahel (1994).

Os campos analisados são de três categorias: energéticos, dinâmicos e higrométricos.

Os campos energéticos: balanço de energia na superfície, fluxo de calor latente e sensível, energia estática húmida, fluxo de radiação de pequenos comprimentos de ondas (Shortwave) e de grande comprimento de onda (Longwave).

Os campos dinâmicos: pressão ao nível médio do mar, a altura geopotencial e o vento a 200hPa e 600hPa, corte meridional médio da velocidade vertical (Ómega) para Sahel-Oeste e Sahel-Este.

Os campos higrométricos: temperatura e humidade do ar, precipitação e temperatura de superfície da água do mar (SST – *Sea Surface Temperature*).

Os resultados de diferentes análises diagnósticos aplicados aos campos meteorológicos obtidos foram apresentados no Capítulo III, intitulado Dinâmica da Monção Oeste Africana, Constatações e Diagnósticos.

- Dados de observação (precipitação do Sahel; 1960-2000):

Para estudar a variabilidade de precipitação sazonal no Sahel e modelação climática, a metodologia consistiu numa análise estatística aplicada aos dados observados de precipitação do Sahel interpolados nos pontos da grelha; série temporal de 1960 à 2000. Estas análises foram possibilitadas com as aplicações dos Softwares MINITAB, MATLAB, XLSTAT, STATISTICA, SURFER, PAINT, EXCEL, GrADS, WORD, etc.

Numa caracterização espaço-temporal, com base no processo estocástico, analisou-se o modelo da tendência, a contribuição da sazonalidade das séries e análise em componentes, histograma de frequência, variabilidade de cúmulos anuais de precipitação e procedeu-se também a uma análise espectral pelo método de entropia máxima com a finalidade de determinar os periodogramas, para a região do Sahel-Este e Sahel-Oeste.

Em termos de modelação e previsão sazonal, apresenta-se a título de exemplo os resultados das previsões sazonais de precipitação elaboradas pelo Centro ACMAD para África Ocidental (PRESA-AO/09), baseadas nas aproximações estatísticas e, finalmente procedeu-se simulações de validação do empenho do Modelo Climático de Previsão Sazonal (Modelo CPT - Climate Predictability Tool, desenvolvido pelo IRI e em aplicação no ACMAD).

Com base nos resultados dos capítulos anteriores (Capítulos III e IV), conjugados com os dados sobre a evolução demográfica e exemplo de degradação dos ecossistemas do Sahel, nomeadamente, o desaparecimento do Lago Tchad, foram suficientes para abordar no Capítulo V, impactos da dinâmica da Monção Oeste Africana e da variabilidade da precipitação sazonal no Sahel sobre as populações e sobre os ecossistemas.

CAPÍTULO III: DINÂMICA DA MONÇÃO OESTE AFRICANA; CONSTATAÇÕES E DIAGNÓSTICO

O objectivo deste capítulo é de descrever, de forma sumária, os fundamentos teóricos e o estado do conhecimento científico sobre a dinâmica da monção oeste africana à escala regional de forma a poder estabelecer um quadro diagnóstico sobre as causas prováveis do seu enfraquecimento que se presume estar na origem das grandes secas dos anos 70 e 80 no Sahel, analisando e/ou diagnosticando o comportamento dos parâmetros meteorológicos nos dois anos de referência: 1984 (ano seco) e 1994 (ano chuvoso), durante as fases do início, da intensificação e do enfraquecimento da monção no Sahel.

O clima da África Ocidental é caracterizado por uma alternância de duas épocas: seca e húmida. Esta última é associada ao regime da monção que se instala sobre a região do Sahel entre os meses de Junho à Setembro. Este fenómeno é devido, em parte, a subida do anticiclone de Santa-Helena no Golfo da Guiné e a instalação de uma depressão térmica sobre o Sahara. Esta condição favorece uma advecção do ar húmido sobre as regiões sub-saharianas, originando o surgimento das ondas de leste e de uma convecção profunda sobre o Sahel sob forma de linhas de borrascas.

O fenómeno de monção é resultante duma manifestação de alternância sazonal de diferencial de pressão entre o oceano e o continente, resultante da repartição latitudinal da energia solar no topo da atmosfera em função das épocas do ano e da resposta do sistema climático em termos de aquecimento diferencial entre o continente e o oceano (Pascale BRACONNOT, 2005). Esta variabilidade é em parte controlada pelas variações de condições oceânicas e da forte interacção entre o oceano e atmosfera nas regiões equatoriais. O sistema de monção parece também particularmente vulnerável às alterações climáticas em curso sob impacto de actividades humanas. A mudança do clima pode vir a manifestar-se não somente numa mudança das características médias da monção, mas também na mudança da variabilidade ou da frequência dos fenómenos extremos, traduzindo-se, segundo as regiões, num aumento de inundações ou de períodos de seca intensa.

A gravidade das mudanças observadas nos meados dos anos 70, impõe interrogar sobre a sua origem: Será que é um risco climático "natural" que podemos esperar o fim? Ou melhor é a primeira manifestação de alterações climáticas em que o Homem será em parte responsável e que devemos temer o seu possível agravamento? A resposta a esta dupla interrogação só poderá ser dada de forma eficiente, quando os modelos climáticos forem totalmente fiáveis. No entanto, antes de poder fazer um diagnóstico sobre as causas destas alterações, é indispensável conhece-las e então precisar onde, quando e como se manifestam.

Os Cientistas suspeitam que o aquecimento de superfície da água do Atlântico e as alterações das superfícies continentais (desflorestação e utilização inadequada dos solos) são uma das causas de secas no Sahel.

As chuvas estão a tornar cada vez mais raras no Sahel? Este fenómeno é reversível? Tem causas regionais ou prefigura as modificações profundas do sistema climático mundial?

Para responder estas questões, é necessário compreender bem os diferentes mecanismos que regem a monção oeste africana, a sua variabilidade e o seu impacto sobre o ciclo hidrológico e consequentemente sobre as populações e sobre os ecossistemas.

3.1. Monção Oeste Africana (MOA)

O termo "monção" é de origem Árabe "*mawsin*" significa época do ano. A monção representa a mudança sazonal da direcção dos ventos. Esta inversão de fluxo é principalmente ligada aos contrastes térmicos existentes entre os continentes e os oceanos. No caso da monção oeste africana é a diferença de temperatura entre o Continente Africano e o Oceano Atlântico (principalmente) que cria esta inversão de escoamento.

A Monção Oeste Africana é um dos três grandes sistemas de monções que controlam o clima da zona tropical. Regionalmente ela é o principal factor regulador do ciclo hidrológico e a sua variabilidade tem um impacto maior sobre os recursos hídricos, na agricultura e no desenvolvimento das epidemias (Thierry L., 2002). À escala planetária ela restabelece ligações com outros sistemas de monções e participa no equilíbrio geral do clima terrestre, através, nomeadamente, das circulações meridionais e zonais que favorecem as trocas de humidade e da energia nas regiões tropicais para as regiões de latitudes médias e altas.

A monção oeste africana pertence ao sistema acoplado terra-oceano-atmosfera agindo num conjunto geográfico particular: baixas latitudes – geometria das costas – orografia. Na primeira ordem, pode considerar-se este sistema como zonal, forçado por uma circulação térmica directa respondendo aos gradientes das energias estática seca (ESC) e estática húmida (ESH) (Redelsperger J-L. et Al., 2002). Estes gradientes são mais marcantes na camada limite entre o Golfo da Guiné e as regiões continentais da África Ocidental (Plumb e Hou, 1992; Eltahir e Gong, 1996). De uma maneira simples podemos descrever a evolução da monção oeste africana, assim: durante os meses de Março, Abril e Maio, o sol é importante na região Sudano-Saheliana. A energia estática húmida (ESH) aumenta graças ao aquecimento da superfície, e a convecção seca permite uma conversão (adiabática) da entalpia em energia geopotencial. Esta é uma das condições necessárias para activar uma circulação divergente meridional directa sobre a zona Sudano-Saheliano. Isto facilita a advecção de vapor de água de origem Atlântico Equatorial e favorece a convergência húmida nas camadas baixas da atmosfera. Segue-se uma ascensão e uma conversão de tipo adiabático que mantém a convecção profunda e consequentemente a pluviometria.

Estas condições iniciais de Março-Abril-Maio criam condições atmosféricas tais que permitem manter uma circulação térmica directa durante Junho-Julho-Agosto e Setembro. Os movimentos verticais adiabáticos mantêm-se graças à libertação do calor latente de condensação na troposfera média.

A dinâmica regional da MOA é conduzida pelos gradientes de energia estática húmida que resulta de interacção Oceano-Continente e do gradiente Norte-Sul da vegetação; desta feita presume-se que o papel da superfície continental na dinâmica da MOA é de capital importância, embora seja ainda mal conhecido.

A região (África Ocidental – África Central) é aquela onde se observam sistemas convectivos mais intensos do mundo, com uma fase de gelo que não se encontra em nenhuma outra parte. O estudo das interacções entre a circulação regional da monção, ondas de leste associadas ao Jacto de Este Africano e a convecção é essencial para compreender e prever a forte variabilidade de precipitações associadas à MOA.

A África Ocidental conheceu uma seca severa e generalizada no final do Século 20, que representa o mais forte sinal climático observado na terra desde a implantação de sistemas de observação meteorológica.

O impacto desta seca sobre os recursos hídricos e a agricultura foi muito significativo com diferenças notáveis conforme a escala espacial considerada. O "paradoxo saheliano" é uma ilustração destes efeitos de escala. O nível dos lençóis freáticos pode aumentar localmente enquanto que a chuva tem fortemente diminuído. Há necessidade de desenvolver modelos acoplados que permitam prever qual poderia ser o impacto das futuras « anomalias » climáticas sobre o ciclo hidrológico durante os próximos decénios.

3.1.1. Características da Monção Oeste Africana

A parte ocidental do continente africano recebe a grande parte de suas precipitações anuais durante os meses de verão boreal, de Junho à Setembro. Esta época pluviosa é associada a mudança sazonal dos ventos na atmosfera. Este fenómeno é conhecido pelo nome de monção.

No Inverno, o vento sopra do continente para o oceano devido ao contraste térmico. Este contraste térmico cria uma diferença de pressão na superfície entre o oceano (baixas pressões) e o continente (altas pressões). No início de verão, na forma de uma brisa marítima gigante, os ventos mudam de direcção e sopram finalmente do oceano para o continente. Sobre o oceano, as massas do ar húmidas são transportadas para o continente onde esta humidade é transformada por importantes movimentos verticais nas tempestades convectivas.

A monção oeste africana é diferente da monção asiática. Na África Ocidental, este fenómeno de grande escala é zonalmente simétrico, enquanto que na Índia o fluxo é mais complexo. Uma outra diferença importante, entre muitas outras, reside no facto da monção indiana ser mais persistente, em termos de precipitações, do que a monção africana.

As figuras 3.1.2.1 e 3.1.2.2 ilustram as características da monção oeste africana e o contraste térmico entre o oceano e o continente.

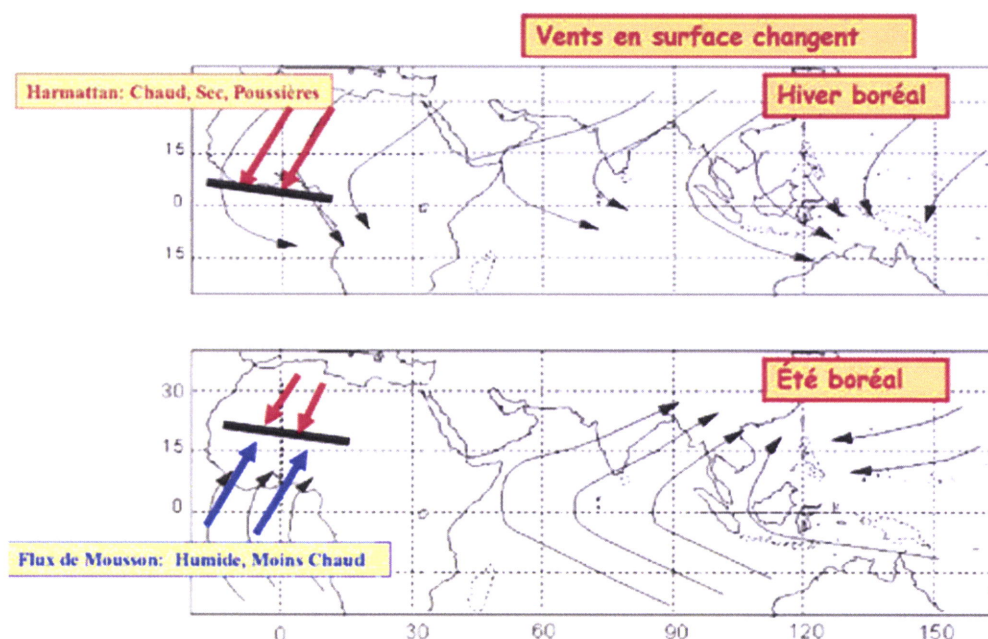


Figura 3.1.1.1: Características da Monção Oeste Africana;

(Fonte: http://www.amma-international.org/IMG/jpg/schema_mousson.jpg)

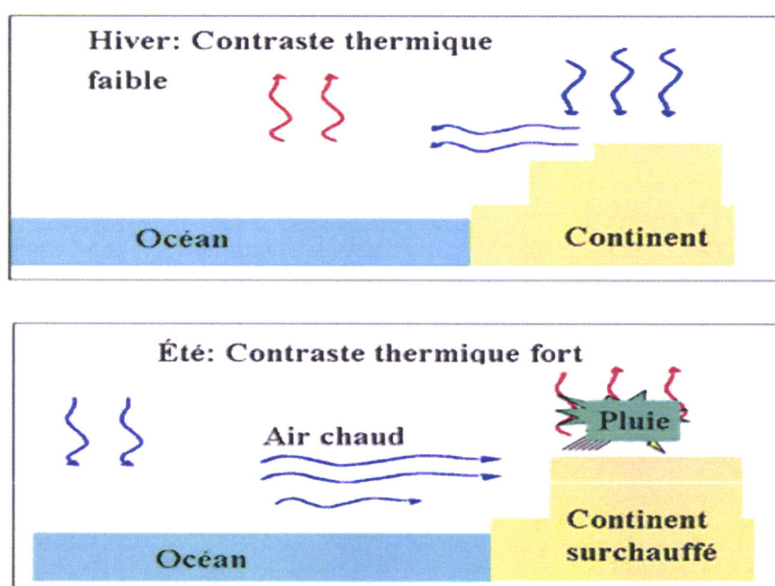


Figura 3.1.1.2: Contrastes térmicos entre o Oceano e o Continente no Inverno e Verão do Hemisfério Norte; (fonte: <http://www.amma-international.org/>).

3.1.2. Novo Modelo da Monção Oeste Africana

Os dados climatológicos, históricos, de precipitação da 2ª metade do Século XX, indicam a existência de um período húmido (de 1951 a 1969), seguido de um período seco (de 1970 à 1980). Esta diminuição de precipitação é sem dúvida a mais forte registada sobre o planeta. Os dados indicam que o deficit pluviométrico do período de 1970-1980, em relação ao período 1950-1960 é quase 50% na parte setentrional do Sahel. Esta situação tem tido graves consequências na agricultura, na pecuária e segurança alimentar.

As pesquisas recentes levadas a cabo pelos pesquisadores do IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*), sobre o estudo da dinâmica da monção na África Ocidental, (Tapsoba, 1997; Le Barbé, Lebel et Tapsoba 2001) mostram que a monção é marcada por duas dinâmicas distintas no tempo e no espaço: um regime continental e outro oceânico, separados por, "um salto", ou seja uma nítida fase de transição que se regista por volta de 22 de Junho. Estas conclusões modificaram o modelo clássico da monção na África Ocidental proposto por Hamilton e Archbold (1945), baseado na progressão contínua do fenómeno de sul para norte, e indicam que a seca no Sahel se explica pelas variações do regime continental.

Com efeito, segundo o novo modelo, a primeira fase da monção inicia na costa atlântica em Fevereiro e propaga-se regularmente para norte e atinge em Maio o Sahel Central - 13° Norte (latitude de Niamey). Segue-se então um período de estabilização, interrompido por uma brusca intensificação da precipitação que se observa simultaneamente em todo o Sahel. Neste período aparece na costa (Golfo da Guiné) uma pequena época seca que é seguida, a partir de Setembro, de uma segunda época de chuvas, em associação com a retirada da monção para o sul. As variações da precipitação durante a primeira fase da monção, que corresponde ao regime oceânico estável, são fracas. A segunda fase, submetida ao regime continental, apresenta uma forte variabilidade interanual. Os cientistas estimam que "O enfraquecimento da monção nesta fase explica, nomeadamente, a grande seca do Sahel, região onde 90% da pluviometria é proveniente do regime continental da monção". A compreensão das causas deste enfraquecimento constitui um desafio importante para o Programa AMMA.

3.1.3. Salto brusco da ZCIT na África Ocidental e variabilidade intra-sazonal da monção

A data de início da monção na África Ocidental está ligada à progressão para norte da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) durante a Primavera e Verão boreais. Sultan e Janicot (2000; 2003) utilizaram as observações diárias de precipitações no período de 1968-1990, para mostrar que esta migração é caracterizada por um "salto" latitudinal brusco quase no fim de Junho, a partir de uma posição quase estacionária a 5°N em Maio-Junho, para uma outra posição de equilíbrio a 10°N em Julho-Agosto (ver a figura 3.1.3.2.1).

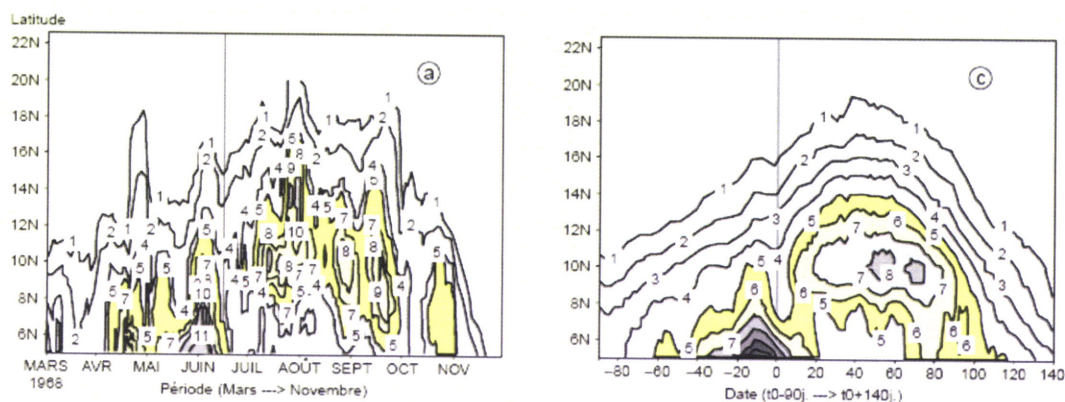


Figura 3.1.3.2.1. (a) – Diagrama latitude-tempo de precipitação diária (mm/dia) entre 1 de Março e 30 de Novembro; (c) Composite entre 1968 e 1990 a volta da data do "salto" do ZCIT. (Fonte: B. Sultan e S. Janicot; 2004).

A climatologia da África Ocidental e os seus mecanismos foram largamente descritas por vários autores (Leroux, 1980; Dhonneur, 1985) para citarmos só estes e, também, nos diferentes artigos consagrados à variabilidade dos regimes pluviométricos e suas consequências.

3.1.4. Escalas da monção oeste africana (MOA)

Para estudar diferentes aspectos que caracterizam a Monção Oeste Africana (MOA), o programa AMMA definiu 4 escalas espaciais e temporais interactuantes:

Escala global: É aquela em que a monção interactua com a circulação geral da atmosfera. Os fenómenos tais como a temperatura da superfície do mar (como El Niño) influenciam a variabilidade da MOA, sua variabilidade sazonal e decenal. É a principal escala do tempo.

Escala regional: É aquela em que os processos da monção e as interacções entre as escalas devem ser consideradas e onde as interacções entre atmosfera, continente e o oceano atlântico tropical (em particular o golfo da Guiné) se realizam. As escalas de tempo mais importantes à nível regional são o ciclo de variabilidade anual, sazonal e interanual.

Meso-escala: É a escala dos sistemas tipicamente de produção de precipitação. Esta escala é essencial para compreender as interacções de escalas da MOA (por exemplo pelas interacções de ondas de leste sinópticas com o jacto de leste africano) e o acoplamento entre a hidrologia e atmosfera à escala de bacias hidroclógicas.

Escala local ou escala sub-mesoescala: Do ponto de vista atmosférico, é a escala da chuva convectiva, centrada na hidrologia do Sahel e no abastecimento dos cursos de água mais ao sul. É a escala central para a agricultura e os estudos consagrados aos impactos sobre as actividades humanas em geral.

A figura 3.1.4.1 mostra diferentes escalas internas da monção oeste africana em função dos seus processos chaves e das suas componentes.

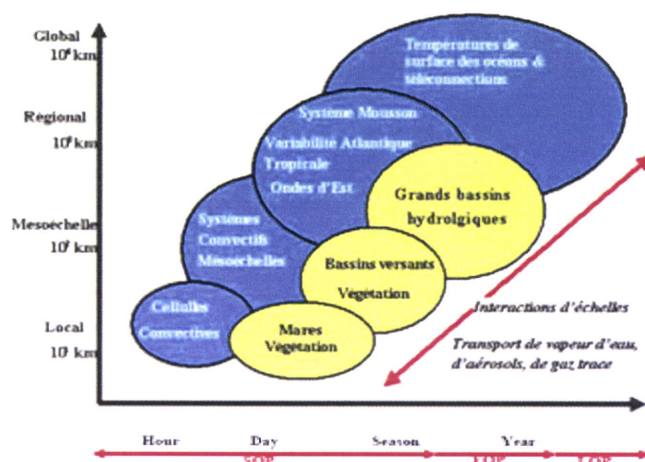


Figura 3.1.4.1: Escalas internas da monção oeste Africana (MOA) em função dos processos chaves e das suas componentes; (Fonte: <http://www.amma-international.org>).

Actualmente, os conhecimentos científicos têm ainda algumas lacunas relativas às interacções complexas entre diferentes aspectos da monção. Certos parâmetros importantes não são registados de forma contínua. É reconhecido que os modelos numéricos reproduzem mal os ciclos diário, sazonal e anual de precipitação na África Ocidental, em particular, e na África Tropical, em geral.

São necessárias observações sistemáticas e contínuas para melhor compreender as interacções entre atmosfera, a biosfera e hidrosfera, que governam a dinâmica e a variabilidade da monção oeste africana.

No âmbito da implementação do Programa AMMA, os cientistas definiram diferentes períodos de observações em diferentes escalas espaciais e temporais, a fim de colmatar a insuficiência de dados e permitir uma melhor compreensão sobre a influência das diferentes componentes da MOA na sua dinâmica.

3.1.5. Períodos de Observações da Monção Oeste Africana

A comunidade científica definiu, no âmbito do AMMA, três períodos de observações para diferentes temas científicos para o estudo da monção oeste africana:

- 1) Período de Observações Especiais (*SOP – Special Observing Period*);
- 2) Período de Observações de Longo prazo (*LOP – Long-term Observing Period*);
- 3) Período de Observações Reforçadas (*EOP – Enhanced Observation Period*);

3.1.5.1. Período de Observações Especiais (*SOP - Special Observing Periods*); Estes períodos a atenção concentram-se sobre observações detalhadas dos processos e dos sistemas específicos de tempo, em diferentes fases chave da época de chuvas durante 4 períodos, em 2006: SOP0 – Janeiro e Fevereiro de 2006; SOP1 – 15 de Maio a 30 de Junho de 2006; SOP2 – 1 de Julho a 14 de Agosto e SOP3 – 15 de Agosto a 15 de Setembro de 2006. As medições fornecidas durante os SOP, combinados com aqueles estabelecidas nos LOP e EOP, vão proporcionar a comunidade internacional um conjunto inestimável de dados para estudar as interacções e os processos que determinam a natureza da Monção Oeste Africana e a sua variabilidade em múltiplas escalas. A figura 3.1.4.1 mostra o dispositivo mobilizado para estes períodos de observação que se revelam de extrema importância.

SOP

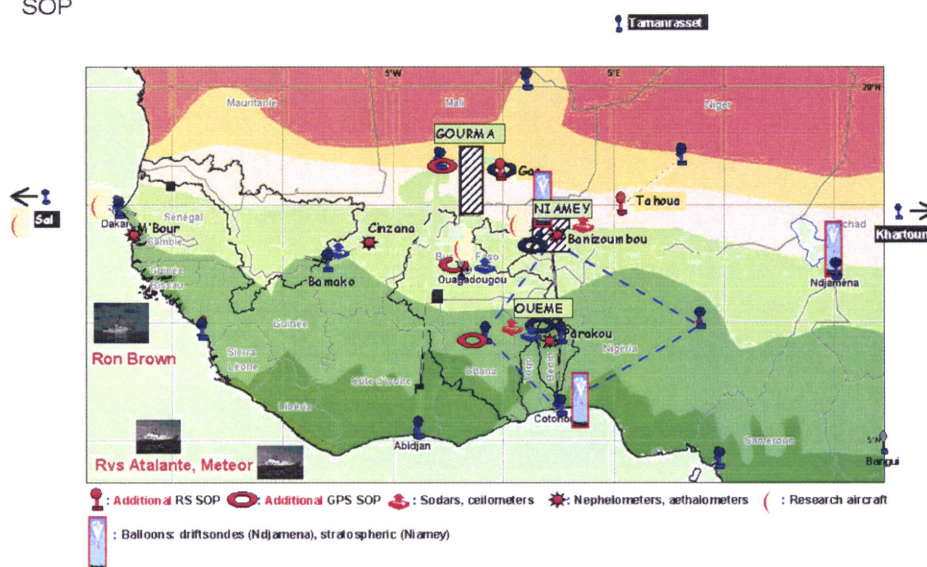


Figura 3.1.4.1: Dispositivos para as observações especiais – SOP; (Fonte: <http://www.amma-international.org>).

SOP 0 – a época seca (de Janeiro à Fevereiro): O objectivo principal do SOP0 é o de identificar, a escala local, as propriedades dos aerossóis, segundo as suas misturas e seus transportes, e os seus impactos à escala regional.

Distinguem-se nesta fase dois períodos de observações:

- primeiro período de observações, sobre a identificação das partículas minerais e de combustão no Níger, Benin e Nigéria;
- segundo período sobre o transporte e a exportação de poeiras sahelianas sobre o oceano (região das ilhas de Dakar e Sal).

SOP 1 – Início da monção (15 de Maio – 30 de Julho): período durante o qual o fluxo de humidade se situa nos primeiros dois quilómetros de atmosfera e penetra de forma mais ou menos progressiva para o norte, do Golfo da Guiné para o domínio saheliano, substituindo o fluxo do Harmattan seco do Norte. Duas fases são notáveis durante a instalação da monção. Primeira – chegada da Frente Inter-Tropical (FIT), que é um tipo de fronteira nos níveis baixos entre as correntes húmidas do sudoeste e as correntes secas do nordeste; a 15°N aquela frente é mais ou menos concomitante com a ocorrência da convecção isolada, sinalizando início de chuvas úteis para os agricultores. Esta etapa é altamente variável, mas com predominância de ocorrência em Maio. A segunda fase é a verdadeira instalação da monção acompanhada de um "salto" da Zona de Convergência Intertropical, de 5°N a 10°N; esta fase é caracterizada por uma grande extensão da zona de monção, tanto em latitude como em intensidade, e de um aumento rápido de precipitações para além dos 10°N. Esta etapa ocorre em geral em Junho (a data média para o período 1968-1990 é o dia 24 de Junho). Mudanças importantes ocorrem igualmente em altitude durante o SOP1, com deslocamento para norte do Jacto de Oeste Subtropical, aparecimento de Jacto de Este Africano na média troposfera e do Jacto de Este Tropical na alta troposfera.

SOP 2 – Monção instalada e intensificação da monção (15 de Julho – 15 de Agosto): período durante o qual uma grande variabilidade de sistemas de precipitações atingem a África Ocidental, ligados à presença de um regime bem estabelecido (fluxo de monção, jacto de este africano, jacto de este tropical), e em relação com a influência sinóptica das ondas de leste. Sistemas de convecção profunda, próximos do bordo Norte do fluxo da monção têm um papel preponderante na formação da chuva e nos transportes verticais, mas conjuntos nebulosos menos intensos e menos estruturados merecem igualmente ser tomados em consideração.

SOP 3 – Enfraquecimento da monção (15 de Agosto – 15 de Setembro): período durante o qual as condições bem estabelecidas descritas no parágrafo anterior começam a desaparecer. No entanto, é um período importante durante o qual as perturbações Oeste-Africanas ligadas à monção influenciam as condições meteorológicas sobre o Atlântico Tropical (e mesmo o Pacífico Este). Desta feita, fortes ondas de leste podem contribuir para iniciar os ciclones tropicais sobre as regiões oceânicas desde que as condições necessárias estejam reunidas. Caso dos potentes "furacões de Cabo-Verde" que se desenvolvem na costa oeste da África.

3.1.5.2. Período de Observações a Longo Prazo (LOP – Long-term Observing Period); consiste em observações de dois tipos:

- Observações históricas para estudar a variabilidade interanual à decadal;
- Observações à longo prazo suplementares (2002-2010) afim de documentar e de analisar a variabilidade interanual da MOA.

Tendo em conta a grande variabilidade das condições climáticas de um ano a outro, torna-se necessário fazer observações sobre vários ciclos anuais afim de ter uma visão apropriada da diversidade dos ciclos sazonais, a volta de um estado médio que é uma concepção estatística, mas nunca observada desta maneira. As observações de atmosfera, da terra e do oceano são então necessárias.

As observações LOP são conduzidas a partir de três localidades principais, com as observações reforçadas de precipitações, hidrologia, condições de superfície e de sub-solo:

- região de Niamey no Sahel (mais extensa, mas com menor volume de precipitações no verão, semi-árida);
- localidade do Mali ao norte do Sahel (semi-árida e mais seca em relação à região de Niamey). Estes contrastes estão ligados a forte gradientes meridionais nas condições de superfície que caracterizam a região, e à dinâmica da monção associada, que influencia a evolução de precipitações da MOA para os pólos; e a localidade situada no Benin na região sul do Sahel.

A figura 3.1.5.2 mostra as localidades referenciadas para o período de observações a longo prazo (LOP). Um estudo recente feito por Barbe et al. (2001) demonstra que as observações de precipitações no solo são

Map of West Africa showing the location of the EOP (Eurasian Oceanographic Programme) sites. The map covers Senegal, Mauritania, Mali, Niger, Chad, and parts of Algeria, Libya, and Egypt. Key locations marked include Dakar, Niamey, Ouagadougou, and Ouémé. A legend at the bottom identifies symbols for Research Vessel (SOP), Mesoscale sites (EOP/LOP), Radio-sounding (EOP, 2RS/day), EOP GPS Station, Research Aircraft (SOP), Buoy (LOP), High frequency SOP soundings, and Aeronal sites. A scale bar at the top right indicates distances from 0 to 1200 km.

3.1.5.3. Período de Observações Reforçadas (EOP -Enhanced Observation Period) – faz a ligação entre o LOP e o SOP. O seu objectivo é o de fornecer, entre 2005 e 2007, dados sobre a variabilidade dos componentes chaves do sistema climático regional. O ano de 2006 é o ano de reforço de dispositivos de observações em certas zonas afim de melhor controlar a dinâmica da monção e a formação da precipitação. A figura 3.1.5.3 apresenta o dispositivo e as localidades referenciadas para o EOP.

- Observações atmosféricas: radiossondagens suplementares na África Ocidental, novas medidas de correntes à superfícies, observações no solo e por teledeteccção (radares, perfis);

- Observações de superfície: medidas hidrológicas e de vegetação no Níger e no Benin nomeadamente, afim de caracterizar sistemas tempestades e a repartição das precipitações, sondagens da estrutura da atmosfera, medidas de radiação, das propriedades das nuvens e dos parâmetros meteorológicos de superfície.

- Observações oceânicas: para além dos dispositivos sobre o continente, as medidas oceânicas do fluxo atmosférico são feitas a partir de um navio de pesquisa no Golfo da Guiné durante duas campanhas anuais, uma em Junho e outra em Setembro de cada ano do EOP.

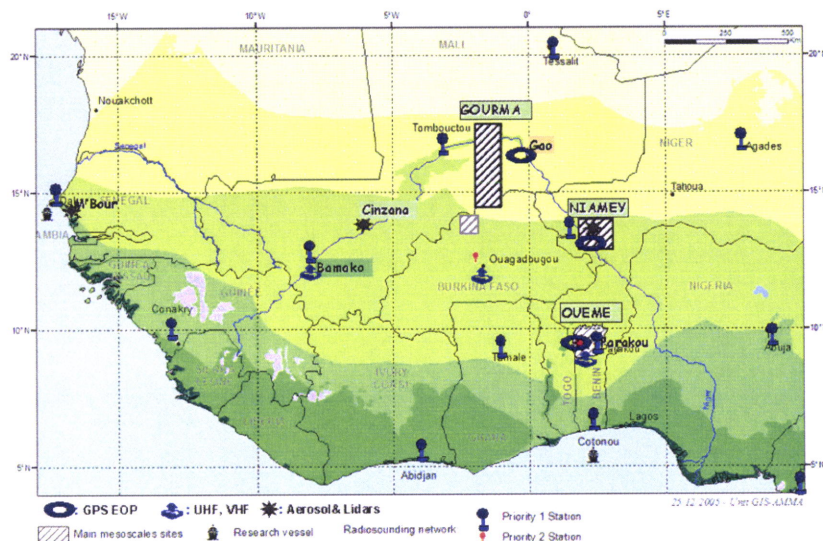


Figura 3.1.5.3: Dispositivos para as observações reforçadas da MOA– EOP;
(Fonte: <http://www.amma-international.org/>).

3.1.6. Ciclo Sazonal da Monção Oeste Africana

O ciclo sazonal da monção oeste africana é caracterizado pelo movimento meridional da zona de convergência intertropical e da circulação atmosférica associada. O Sahel recebe a grande parte das suas precipitações entre Julho e Setembro. Mais ao sul, os totais anuais de precipitações são mais importantes e repartidos em duas épocas de chuvas, na Primavera e no Outono. Os principais elementos da circulação atmosférica (em particular o jacto de este africano e as ondas de leste) têm também um ciclo sazonal pronunciado que influencia fortemente a organização de precipitações.

A figura 3.1.6.1 apresenta o ciclo sazonal de precipitações, no período de 1979 a 1996 em África.

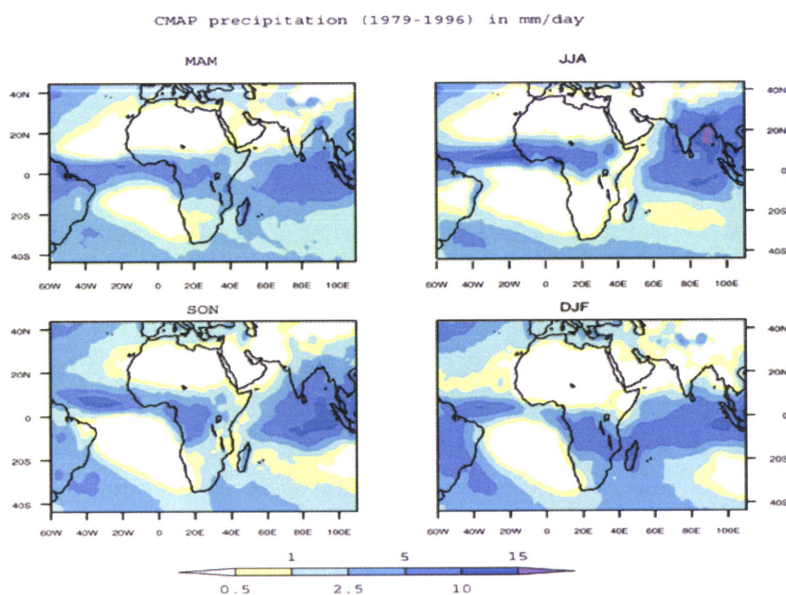


Figura 3.1.6.1: Ciclo Sazonal médio de Precipitações do período 1979-1996, baseado nas estimativas de precipitações segundo Xie e Arkin (1997).

3.1.7. Região da Monção Oeste Africana (MOA) e Mecanismos Associados

A monção oeste africana pertence a um sistema acoplado terra-oceano-atmosfera que actua num conjunto geográfico particular. É sabido que as anomalias da temperatura da superfície do oceano, à escala global, têm um impacto importante sobre a variabilidade interanual e decenal de precipitações no Sahel. A monção oeste africana está associada a quatro campos dos ventos principais: O fluxo de Sudoeste nas baixas camadas, o Jacto de Este Africano (JEA) na média-baixa troposfera, o Jacto de Este Tropical (JET) na alta troposfera, de Junho a Setembro (ver a figura 3.1.6.1), e o Jacto de Oeste Subtropical (JOST) entre 30°N e 35°N, também entre Junho e Setembro.

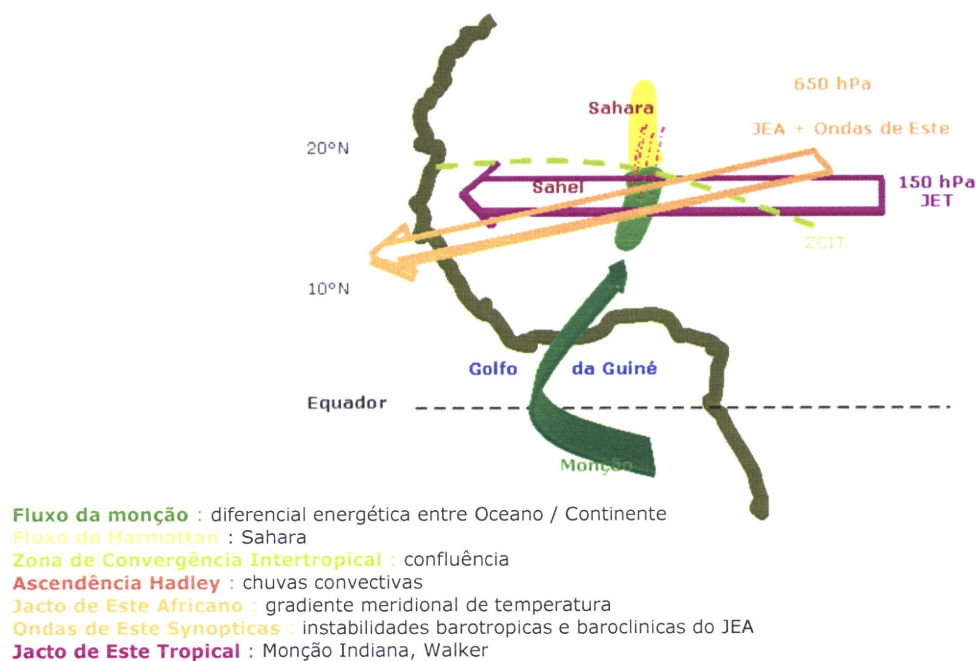


Figura 3.1.7.1: Região da Monção Oeste Africana e os Mecanismos Associados; (Fonte: Aida Diongue – Thèse)

O JEA associado aos contrastes térmicos importantes, Norte-Sul, entre o continente e o oceano é uma parte de assinatura das condições de superfície continental. Em Março encontra-se próximo da costa Guineense onde os valores da ESH são máximos na média troposfera. De Março a, o Agosto seu eixo desloca-se para Norte seguindo os valores máximos da ESH e atingem velocidades máximas em Junho, próximo do 10°N (Redelperger et al., 2002).

3.1.7.1. Centros de Altas Pressões Subtropicais

Os anticiclones subtropicais são elementos fundamentais da circulação geral. São igualmente anticiclones dinâmicos ligados à existência de uma circulação zonal de Oeste nas latitudes médias e de uma circulação zonal de sector Este nas latitudes equatoriais (Dhonneur, 1975).

Os anticiclones dinâmicos interessam geralmente a baixa e a média troposfera. Em altitude, o seu eixo inclina-se para Oeste e para as regiões equatoriais. Esta dupla deslocação em longitude e em latitude é nítida nas posições à superfície e em altitude (4000m) dos anticiclones dos Açores e de Santa Helena. O anticiclone dos Açores, à superfície, é centrado na região dos Açores e, em altitude à Este do mar das

Caraíbas; o anticiclone de Santa-Helena, centrado à superfície ao Sul da Santa-Helena, em altitude ao largo da costa do Brasil.

A figura 3.1.7.1.1 apresenta as posições médias à superfície dos Centros de Acções em Janeiro e em Julho.

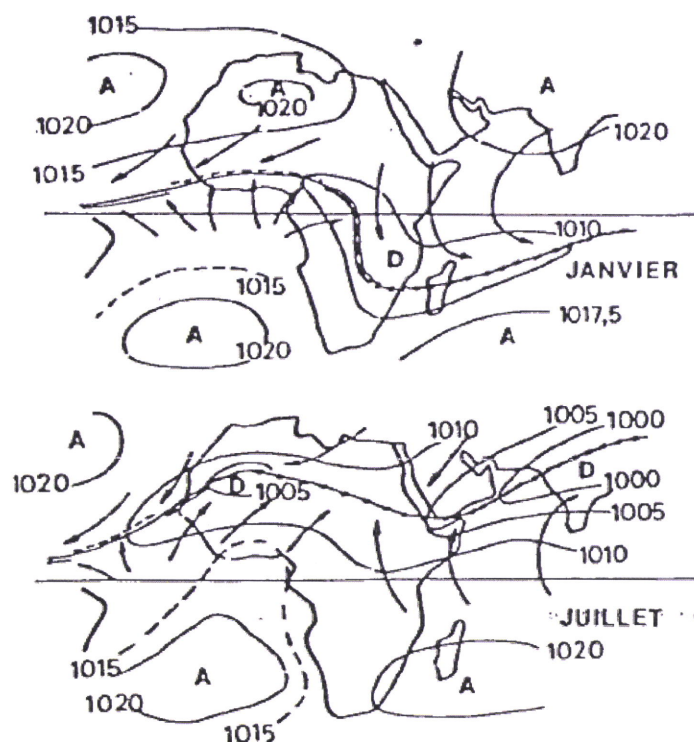


Figura 3.1.7.1.1: Campo de pressão média à superfície em Janeiro e em Julho; (in GARNIER, 1976).

a) Anticiclone dos Açores

Anticiclone dinâmico do Hemisfério Norte é caracterizado por uma forte variação meridional da posição. Está ligado a uma fraca circulação zonal, formado por várias células e inclusões da circulação das regiões temperadas. A sua posição média à superfície é, em longitude próxima de 30°W enquanto que em altitude se situa à volta de 50°W. As suas variações sazonais em latitude e intensidade são, em média:

| | | |
|---------|------|----------|
| Janeiro | 35°N | 1022hPa; |
| Abril | 40°N | 1019hPa; |
| Julho | 40°N | 1020hPa; |
| Outubro | 37°N | 1020hPa. |

a.1) Anticiclone da Líbia

É a parte oriental do anticiclone dinâmico dos Açores, ou a parte ocidental do anticiclone térmico da Ásia, ou ainda uma entidade independente, térmico por certos aspectos e dinâmico por outros. Para simplificar, o anticiclone da Líbia pode considerar-se como uma entidade independente. O carácter dinâmico do anticiclone da Líbia é marcado pela sua persistência em altitude e o seu carácter térmico pelo facto de ele

não ser permanente. No Verão, é substituído, nos baixos níveis, por uma depressão continental de origem térmica. Esta depressão continental funde-se com a depressão equatorial para formar uma única depressão, o que explica a amplitude meridional das variações sazonais do Equador Meteorológico na África Continental.

O anticiclone da Líbia comanda um fluxo de alísios secos e quente de forte evolução diurna. Este alísio seco ou Harmattan é igualmente preponderante na meteorologia das regiões sahelianas de Novembro à Maio (época seca). As variações bruscas deste fluxo, estão ligadas aos deslocamentos das células de alta pressões e aos gradientes barométricos existentes entre 10°N e 20°N e têm, por consequência, a formação de bruma de poeiras fortes. Esta é a origem da bruma seca que, sob forma de núcleos migratórios, interessam o norte do Atlântico Central e a África Ocidental.

b) Anticiclone de Santa-Helena

É o anticiclone dinâmico do Hemisfério Sul caracterizado por uma fraca variação meridional. Esta ligado a uma forte circulação zonal, formado de importantes células que limitam as inclusões da circulação das regiões temperadas. A sua posição média à superfície em longitude observa-se sobre as regiões próximas de 10°W, enquanto que em altitude se situa a 25°W. As suas variações sazonais médias em latitude são:

| | | |
|---------|------|----------|
| Janeiro | 30°S | 1021hPa; |
| Abril | 30°S | 1019hPa; |
| Julho | 28°S | 1024hPa; |
| Outubro | 30°S | 1022hPa. |

3.1.7.2. Ondas de Leste

As Ondas de Leste foram descobertas nos finais dos anos 30 (Dunn, 1940). São perturbações na baixa e média troposfera (de superfície do mar a 5 Km de altitude), que se deslocam de Este para Oeste e servem como motor de circulação ciclónica, para um grande número de depressões tropicais no Atlântico Norte. Riehl (1945) põe em evidência o facto de estas perturbações, agora conhecidas com o nome de "Ondas de Leste Africanas", terem a sua origem no norte do continente africano. Inúmeras teorias sobre o mecanismo de formação destas ondas foram avançadas durante os últimos decénios: Burpee (1972) demonstrou que estas ondas são geradas por uma instabilidade da corrente de Jacto de Este Africano (esta instabilidade conhecida por instabilidade baroclínica, se desenvolve um decréscimo da vorticidade de Sul para Norte). O aparecimento do Jacto de Este Africano é a consequência de inversão do gradiente de temperatura nos níveis baixos da troposfera sobre a parte Oeste e Centro Norte do Continente Africano. Esta inversão é devida ao contraste térmico entre as temperaturas extremamente quentes sobre o Sahara e as temperaturas nitidamente mais frias ao longo do Golfo da Guiné.

Estas ondas deslocam-se geralmente com o fluxo dos alísios sobre o Oceano Atlântico. Elas começam a aparecer em Abril/Maio e desaparecem em Outubro/Novembro. As ondas têm uma vida média de três a quatro dias e um comprimento de onda de 2000 à 2500Km, (Burpee 1974). Em média, 60 Ondas de Leste são geradas sobre o Continente Africano todos os anos.

3.1.7.3. Linhas de Instabilidade Tropicais

Uma linha de instabilidade tropical é a parte dianteira de uma perturbação de mesoescala em propagação; ela consiste basicamente em Cúmulos (Cu) e Cumulonimbus (Cbs) e apresenta na sua retaguarda uma nuvem do tipo bigorna que, em geral, origina precipitação intensa.

Distinguem-se no Sahel três sistemas essenciais de precipitações: sistemas convectivos isolados, sistemas convectivos organizados e linhas de borrasca. Estes dois últimos se reagrupam-se nos sistemas ou complexos convectivos de mesoescala.

A figura 3.1.7.3.1 mostra a manifestação de uma linha de instabilidade (linha de borrasca) na África Ocidental, em Outubro de 2006.

Segundo Gamache e Houze (1982), a primeira descrição de instabilidade tropical como fenômeno atmosférico distinto, ocorreu em 1945, enquanto que a primeira documentação desses sistemas ocorreu em 1969 durante uma campanha experimental.

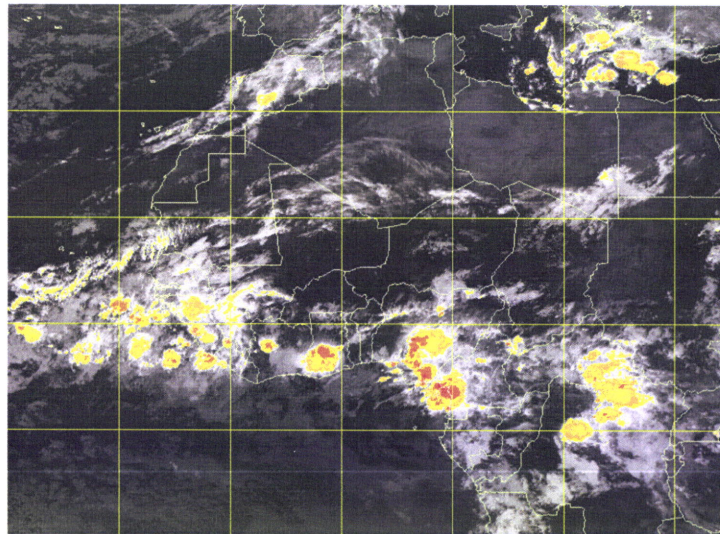


Figura 3.1.7.3.1: Sistemas Convectivos de Meso-escala e Linhas de borrascas na África Ocidental; Imagem MeteosatIR10.8; Outubro de 2006; (Fonte: <http://aoc.amma-international.org>).

Dentro de uma linha de instabilidade, certas localizações são especialmente favoráveis para o crescimento de tempestades severas. Ao longo da linha, ocorrem muitas tempestades ao mesmo tempo, influenciando-se umas às outras. O fluxo descendente a partir de uma tempestade na linha de instabilidade pode alimentar o ar dentro de uma outra tempestade, e a convergência mais intensa pode ajudar as tempestades a crescerem mais do que cresceriam como tempestades individuais.

Muitos estudos apontam que a força de um sistema convectivo de mesoescala é a convergência associada à ZCIT. Nota-se, geralmente, convergência de larga escala muitas horas antes da formação das Linhas de Instabilidade. Esta convergência de larga escala causa intensificação ou organização da humidade nos níveis médios.

Nos trópicos as Ondas de Leste são consideradas como importantes mecanismos forçantes de sistemas convectivos de mesoescala. Porém, com menor importância do que a convergência de larga escala. Elas funcionam como um mecanismo de accionamento para aqueles sistemas, na região.

Nas latitudes tropicais, a principal fonte de energia provem da libertação do calor latente nos sistemas das nuvens convectivas. A distribuição da energia estática húmida tem um papel muito importante.

A circulação tropical é comandada pela célula de Hadley, cuja importância e situação meridional variam consideravelmente ao longo do ciclo anual. Entre as células do Hemisfério Norte e Sul situa-se o Equador Meteorológico (EM).

O equador meteorológico é também uma zona de concentração de vapor de água, advectado pelos alísios e as circulações de monção nas camadas baixas, e da libertação do calor latente pela ascensão e condensação. Na África Ocidental, o EM separa duas massas de ar de origem e de caracteres diferentes: ao norte, o ar continental quente e muito seco onde os ventos são de direcção nordeste (Harmattan), e a sul, o ar oceânico menos quente e mais húmido, proveniente do Golfo da Guiné (monção de sudoeste).

As posições dos grandes centros de acção, os anticiclones de Santa-Helena, dos Açores e da Líbia determinam os deslocamentos em latitude, ao longo do ano do Equador Meteorológico e dos fenómenos que lhe são associados. Em Janeiro, ocupa a posição mais ao sul, o contraste entre as duas massas de ar é pouco marcado; em Agosto atinge a posição mais a norte e neste período, o contraste térmico é mais marcante entre as duas massas do ar.

3.1.7.4. Zona de Convergência Intertropical

A zona de convergência intertropical (ZCIT) é um dos mais importantes sistemas meteorológicos nos trópicos e tem uma ligação estreita com a dinâmica da monção oeste africana. Devido à sua estrutura física, a ZCIT tem se mostrado decisiva na caracterização das diferentes condições de tempo e de clima em diversas áreas da Região Tropical. A sua influência sobre a precipitação nos Continentes Africano, Americano e Asiático tem sido aceite e referida em vários trabalhos como Hastenrath e Heller (1977), Lamb (1978), Sika e Gadgil (1985), Moura e Shukla (1981), Chung (1982), Citeau et al. (1988a e 1988b), entre outros.

3.1.8. Dinâmica da Monção Oeste Africana

A monção oeste africana faz parte de um sistema acoplado terra-oceano-atmosfera actuando num conjunto geográfico particular: baixas latitudes – geometria das costas – orografia. Os estudos do Plumb e Hou, 1992, Eltahir e Gong, 1996, mostraram que este sistema é composto de um sistema zonal, comandado pela circulação térmica directa seguindo os gradientes meridionais das energias estática húmida e seca. Estes gradientes são mais marcantes na camada de separação entre o Golfo da Guiné e as regiões continentais da África Ocidental.

Existem duas dinâmicas distintas no tempo e no espaço – um regime oceânico e um regime continental – separados por "um salto". A primeira fase da monção corresponde a um regime oceânico. Ela começa em Fevereiro na costa do Golfo da Guiné depois propaga-se regularmente para o Norte e atinge em Maio o Sahel Central (13°N, latitude de Niamey). Após um período de estabilização, produz-se uma brusca intensificação de precipitações. Nos meses de Setembro e Outubro observa-se a fase do enfraquecimento da monção continental.

De forma simplificada podemos descrever a evolução da monção oeste africana em dois níveis; à superfície e em altitude:

a) À Superfície

Na superfície, a dinâmica da monção oeste africana é caracterizada pelo movimento dos ventos alísios segundo as épocas do ano:

- Durante os meses de Julho, Agosto e Setembro – período de monção; observa-se um forte fluxo de monção do sector sul-sudoeste e uma fraca actividade do harmattan (ventos de norte-nordeste), Figura 3.8.1.a);
- Nos meses do Inverno – Dezembro, Janeiro e Fevereiro; observa-se fraca actividade do fluxo de monção e uma intensificação do harmattan – ventos de norte-nordeste, figura 3.8.1.b).

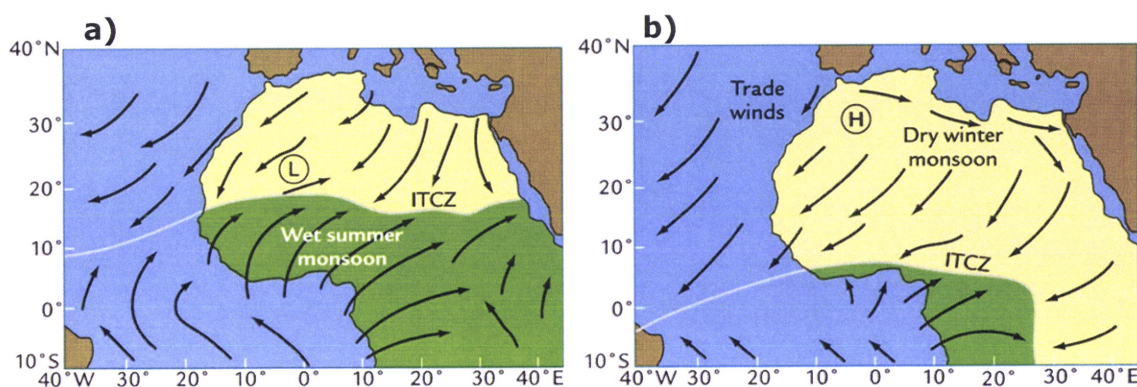


Figura 3.1.8.1: Dinâmica da monção oeste africana à superfície; a) período de Julho, Agosto e Setembro, e b) período de Dezembro, Janeiro e Fevereiro;

(www.cerfacs.fr/globc/links/presentation/la_mousson_en_Afrique_de_l_ouest.pdf).

b) Em Altitude

Em altitude, a circulação atmosférica é dominada pelos fluxos de leste cujos núcleos de velocidade máxima caracterizam a posição do Jacto de Este Africano (JEA), na troposfera média (600hPa) e do Jacto de Este Tropical (JET), na alta troposfera (200hPa).

O Jacto de Este Tropical (JET): Vento de Leste principalmente ligado à fonte de calor da depressão térmica localiza-se aos 200hPa (12.000 metros) com velocidades máximas do vento de aproximadamente de 10 a 15 m/s entre 5°N e 10°N no Verão (figura 3.1.8.3).

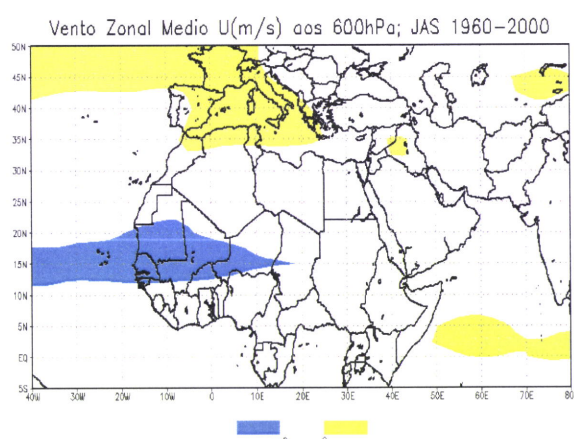


Figura 3.1.8.2: Vento Zonal à 600hPa

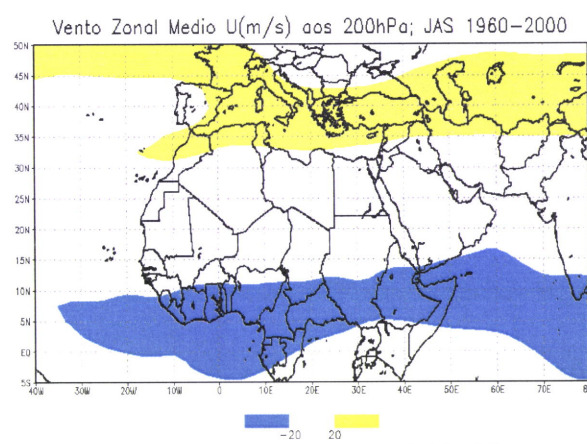


Figura 3.1.8.3: Vento zonal à 200 hPa

A dinâmica da convecção profunda alimenta os fluxos de Este aos 200hPa, que definem o Jacto de Este Tropical cuja posição e a deslocação meridional é quase igual à da ZCIT.

Nas alta troposfera (200hPa), figura 3.1.8.2, destaca-se a presença do Jacto Africano de Este (African Easterly Jet – AEJ), Vento de Leste principalmente ligado à diferença meridional de temperatura entre o Continente Africano e o Oceano Atlântico (Golfo da Guiné), que migra para Norte no período da monção.

Para compreender as causas prováveis da perturbação da monção oeste africana, que é o objecto deste estudo, apresentam-se na secção 3.3 os resultados do estudo diagnóstico feito com base na comparação do comportamento dos parâmetros meteorológicos (energéticos, dinâmicos e higrométricos) durante as três fases de evolução da monção oeste africana.

3.2. Constatações

O Sahel conheceu nos últimos 30 anos as secas mais severas do Século XX. Apesar de uma mobilização internacional - vários esforços de pesquisas e estudos levados a cabo sobre a monção, as previsões climatológicas a escala sazonal ainda carecem de perfeições. É reconhecido que nesta região do globo, a mudança climática global demonstra riscos evidentes de repercussões particularmente importantes sobre a vida das populações. É por isso que tornou-se crucial melhorar as previsões.

Mais de 60 laboratórios europeus, africanos e americanos (ver anexo-1) participam no Programa AMMA, iniciado pelos pesquisadores Franceses. Importantes meios materiais e humanos estão sendo mobilizados (aviões, barcos, bóias, radiossondagens, satélites, estações terrestres, modelização, etc.) para compreender diferentes aspectos da monção oeste africana.

Paralelamente a estes esforços, constata-se um factor importante e preocupante que é o crescimento demográfico do Sahel que atinge a taxa de aproximadamente 3% anual e uma taxa de urbanização de 7% por ano. Estes factores têm um peso sobre o ambiente e na gestão dos recursos naturais e contribuem sobremaneira na degradação dos ecossistemas.

Vários estudos sobre a precipitação no Sahel têm mostrado uma diminuição de precipitação. Nos últimos anos as condições pluviométricas melhoraram na parte sul, mas ainda persiste os deficits pluviométricos na parte Oeste do Sahel.

A diminuição da precipitação no Sahel tem como consequência directa degradação de vida rural e como corolário o êxodo rural e a emigração.

A variabilidade da precipitação no Sahel e as consequentes secas são atribuídas a perturbação da monção oeste africana.

3.3. Estudo Diagnóstico

Nesta secção apresentam-se os resultados obtidos das análises dos campos de diferentes parâmetros meteorológicos que influenciam a dinâmica da monção africana, a saber os parâmetros energéticos, dinâmicos e da termodinâmica da atmosfera, bem como da evolução de precipitação nos dois anos de referência, 1984 (ano da seca no Sahel = índice de precipitação inferior à normal) e 1994 (ano excedentário em termos de precipitação = índice de precipitação superior à normal); ver a figura 4.1.3 que apresenta os índices de precipitação no Sahel.

3.3.1. Parâmetros energéticos:

A radiação solar é a principal fonte de energia do nosso Planeta. São as variações de intensidade da radiação recebida, decorrentes dos movimentos da terra – de rotação em torno de seu próprio eixo e de translação a volta do sol – que provocam a maior parte das modificações nas condições atmosféricas, resultando em fenómenos meteorológicos e oceanográficos. As trocas radiativas correspondem a transferências de energia por radiação (Jacob, 1999).

Para os parâmetros energéticos comparamos, nos dois anos de referência (1984 e 1994) e nos três períodos da evolução da monção oeste africana (início, intensificação e fim), o balanço de energia à superfície, a radiação resultante de pequeno e grande comprimento de onda, o fluxo do calor latente, o fluxo do sensível e a energia estática húmida.

a) Balanço de energia à superfície

A radiação absorvida pela superfície ou a radiação resultante é a quantidade de energia radiativa disponível na superfície e pode ser transformada em outras formas de energia pelos diversos mecanismos físicos ou biológicos da superfície (Bonn e Rochon, 1992). A radiação resultante (R_n) é obtida pela equação do balanço radiativo:

$$R_n = (1 - \alpha_s)R_g + (1 - \rho_s)R_a - \varepsilon_s \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (3.3.1)$$

Onde

R_n = radiação resultante (W/m^2)

α_s = albedo da superfície

R_g = radiação solar incidente global de pequeno comprimento de onda (W/m^2)

ρ_s = coeficiente da reflexão térmica da superfície

R_a = radiação térmica incidente de grande comprimento de onda, emitida pela atmosfera (W/m^2)

ε_s = emissividade da superfície

σ = constante de Stefan Boltzmann ($W/m^2 \cdot K^4$)

T_s = temperatura radiativa da superfície ($^{\circ}K$)

A equação (3.3.1) pode ainda escrever-se da seguinte forma:

$$R_n = (SW \downarrow - SW \uparrow) + (LW_a \downarrow - LW_a \uparrow) - LW_{global} \uparrow \quad (3.3.1.a)$$

ou seja

$$R_n = (SW \downarrow - SW \uparrow) + (LW_a \downarrow - LW_{total} \uparrow) \quad (3.3.1.b)$$

Onde: R_n = Radiação resultante; SW = Shortwave; LW = Longwave; LW_a = Longwave atmosférico; As setas descendentes (\downarrow) e ascendentes (\uparrow), representam as componentes da radiação que entram e as que saem da superfície, respectivamente.

- O balanço de energia à superfície permite determinar indirectamente o transporte vertical turbulento do vapor de água para atmosfera, por evaporação ou evapotranspiração, o qual se fundamenta no princípio de conservação de energia aplicado a diferentes fluxos energéticos que ocorrem na superfície.

Geralmente o balanço energético à superfície é negativo nas latitudes superiores à 40° e é positivo nas latitudes inferiores à 40°. Este fenómeno é essencialmente ligado a repartição diferenciada da radiação incidente. As regiões desérticas (Sahara, Médio-Oriente, Austrália) constituem uma excepção porque estão situadas nas latitudes inferiores a 40° e têm um balanço radiativo negativo, por causa de forte albedo e porque emitem um fluxo importante da radiação infravermelha (grande comprimento de ondas).

O balanço radiativo ou radiação resultante ou efectiva do planeta corresponde à diferença entre o fluxo de radiação solar absorvida (incidente menos reflectida) e o fluxo térmico emitido para espaço. O fluxo solar absorvido depende de dois parâmetros, o fluxo solar incidente e o albedo, que é a fracção reflectida deste fluxo (Robert Kandel, 1992).

O fluxo de radiação resultante à superfície resulta do balanço entre os fluxos de radiação solar e terrestre (Peixoto e Oort, 1992):

$$F_{rad}^{sur} = F_{SW} + F_{LW} \quad (3.3.2)$$

O balanço de radiação de pequeno e de grande comprimento de ondas são dadas pelas seguintes expressões:

$$F_{SW} = F_{SW} \downarrow - F_{SW} \uparrow \text{ e } F_{LW} = F_{LW} \downarrow - F_{LW} \uparrow \quad (3.3.2.a)$$

Consequentemente, o balanço de energia expressa-se:

$$F_{rad}^{sf} = F_{SW} \downarrow - F_{SW} \uparrow + F_{LW} \downarrow - F_{LW} \uparrow \quad (3.3.3)$$

Onde as setas descendentes (\downarrow) e ascendentes (\uparrow), representam as componentes da radiação que entram e as que saem da superfície, respectivamente.

O balanço da radiação foi estabelecido para dois anos de referência – 1984 (ano seco) e 1994 (ano húmido), para os seguintes períodos: 15 de Maio a 15 de Julho, que corresponde ao início da monção; 15 de Julho a 15 de Agosto, que corresponde a fase de intensificação da monção; e 15 de Agosto a 15 de Setembro, correspondente ao enfraquecimento ou fim da monção no Sahel.

As figuras 3.3.1.a.1, 3.3.1.a.2 e 3.3.1.a.3 mostram os campos resultantes do calculo da balanço de energia à superfície 1984 e 1994, no início, intensificação e fim da monção no Sahel, respectivamente.

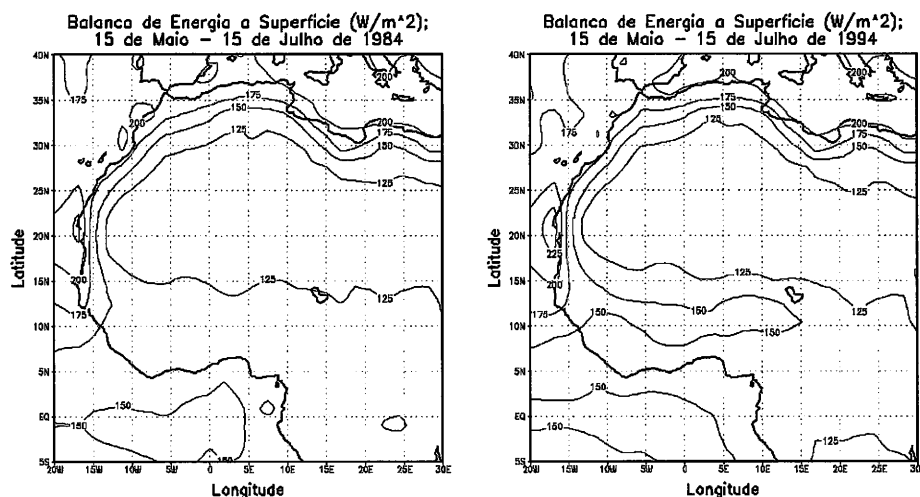


Figura 3.3.1.a.1: Balanço de energia à superfície (W/m^2), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

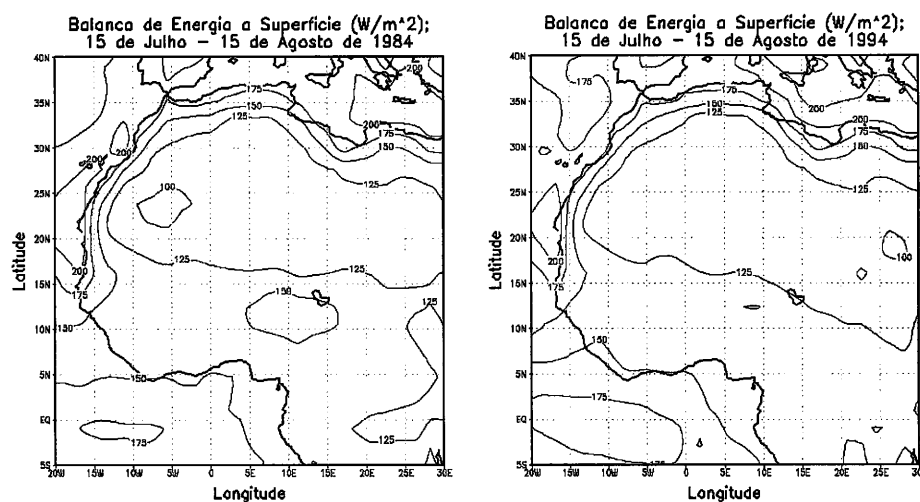


Figura 3.3.1.a.2: Balanço de energia à superfície (W/m^2), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

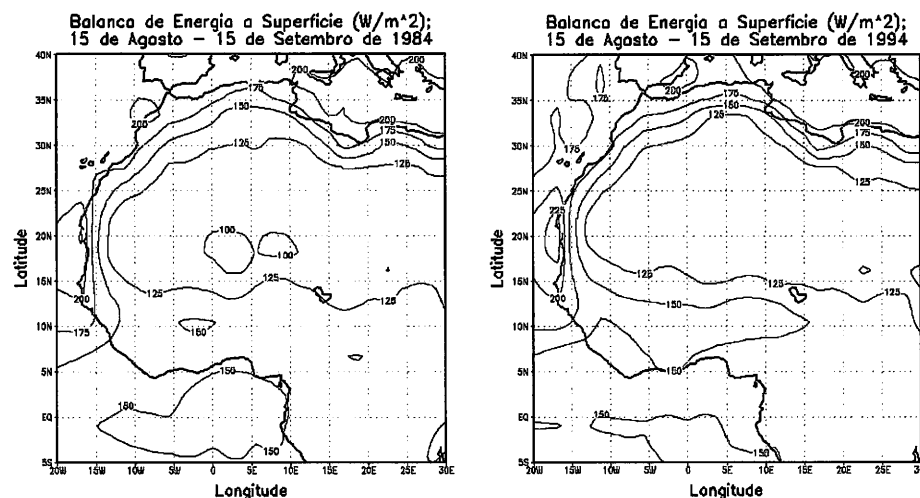


Figura 3.3.1.a.3: Balanço de energia à superfície (W/m^2), no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Observando os campos do balanço da energia à superfície, durante os dois anos de referência, 1984 e 1994, nota-se que na banda do Sahel (região de estudo) os valores oscilam entre 125 W/m^2 , no interior do continente, a 200 W/m^2 , na costa. Os padrões são praticamente semelhantes e não se notam diferenças significativas, no Sahel, entre 1984 e 1994, durante as três fases da monção, respectivamente.

b) Radiação Resultante de Pequeno Comprimento de Onda (Shortwave)

A radiação de pequeno comprimento de onda (shortwave) corresponde à radiação solar incidente directa e difusa. Observa-se uma variação diurna e sazonal pronunciadas e também a influência da presença das nuvens. A radiação solar de pequeno comprimento de onda que entra, uma parte é reflectida pela superfície ($F_{SW\uparrow} = A_{sfc} F_{SW\downarrow}$); onde A_{sfc} é o albedo da superfície, então a radiação resultante de pequeno comprimento de onda é dada por:

$$F_{SW} = (1 - A_{sfc}) F_{SW\downarrow} \quad (3.2.4)$$

Isto é, a radiação resultante é dada pela diferença entre a radiação incidente e reflectida. As figuras 3.2.1.b.1, 3.2.1.b.2 e 3.2.1.b.3 representam os campos de fluxos de radiação resultante de pequenos comprimentos de onda, para 1984 e 1994, respectivamente; nos períodos de início, intensificação e fim da monção.

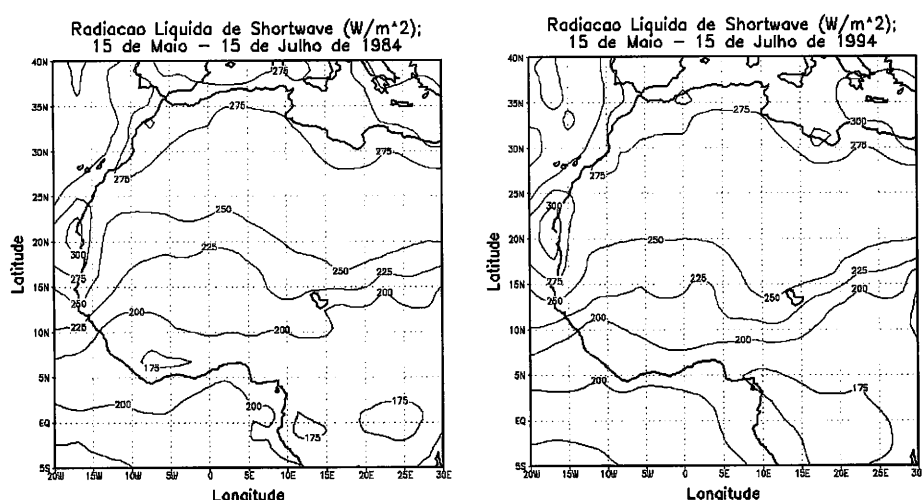


Figura 3.3.1.b.1: Fluxo de Radiação Resultante de Pequenos Comprimentos de Ondas (W/m^2), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

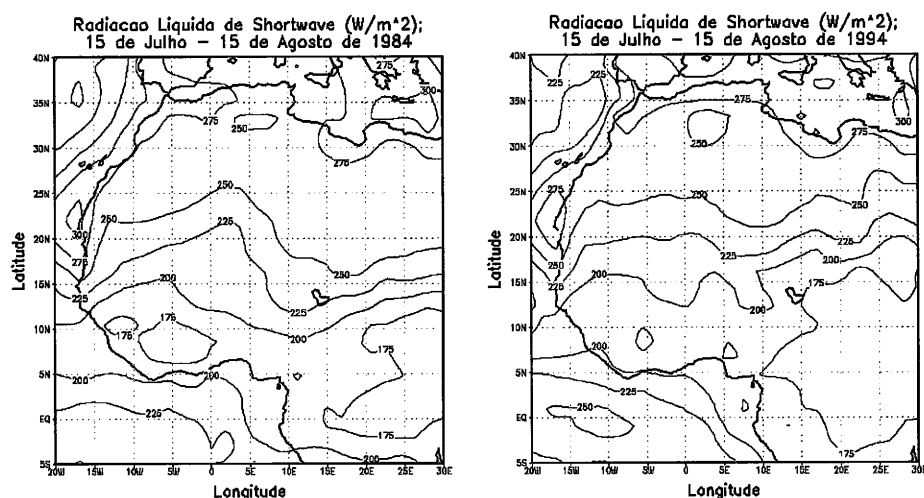


Figura 3.3.1.b.2: Fluxo de Radiação Resultante de Pequenos Comprimentos de Ondas (W/m^2), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

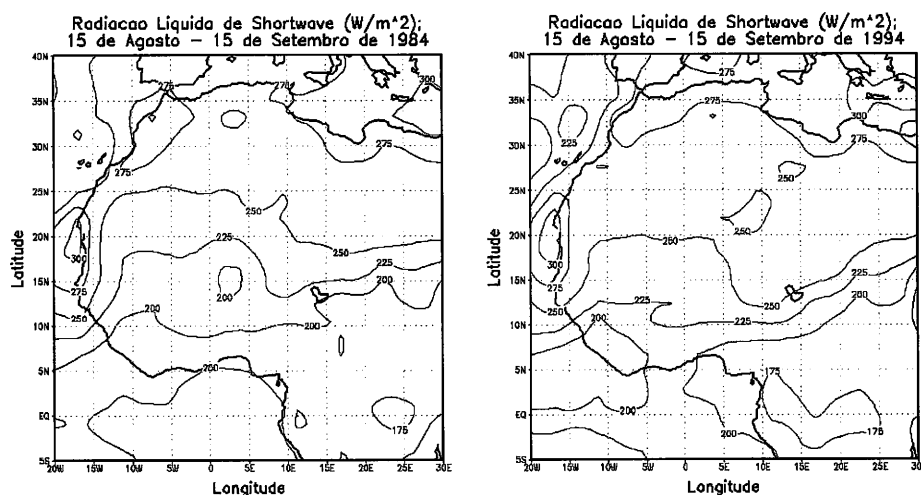


Figura 3.3.1.b.3: Fluxo de Radiação Resultante de Pequenos Comprimentos de Ondas (W/m^2), na fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

No início da monção (figura 3.3.1.b.1), em 1994, registam-se valores de radiação resultante de pequeno comprimento de onda superiores em relação aos do ano 1984.

Na fase da intensificação da monção (figura 3.3.b.2) a situação inverteu-se. Esta inversão deve-se a presença da nebulosidade mais importante em 1994 em relação a 1984.

No fim da monção (figura 3.3.1.b.3), tal como no período do início, observam-se que os valores em 1994 são ligeiramente superiores aos do 1984.

c) Radiação Resultante de Grande Comprimento de Onda (Longwave)

A radiação de grande comprimento de onda que entra $F_{LW\downarrow}$ vem da atmosfera e depende do perfil vertical da temperatura, das nuvens e da distribuição vertical dos absorventes. Não apresenta uma variação diurna significativa. A radiação de grande comprimento de onda que sai $F_{LW\uparrow}$ é dada pela Lei de Stefan-

Boltzmann, supondo uma emissividade ϵ da superfície da terra. Segue o ciclo diurno da temperatura da superfície com um valor máximo no período da tarde e um mínimo no período de manhã. O fluxo da radiação de grande comprimento de onda que entra e o que sai são menores em comparação com o da radiação solar resultante. Entretanto, torna-se mais importantes durante a noite, em que $F_{SW}=0$. Geralmente $|F_{LW\downarrow}| < |F_{LW\uparrow}|$.

O fluxo de radiação resultante de grande comprimento de onda a superfície é dado por:

$$F_{LW} = F_{LW\downarrow} - F_{LW\uparrow} \quad (3.3.5)$$

As figuras 3.3.1.c.1, 3.3.1.c.2 e 3.3.1.c.3, apresentam a comparação do fluxo de radiação resultante de grande comprimento de onda, para 1984 e 1994, no início, intensificação e fim da monção no Sahel, respectivamente.

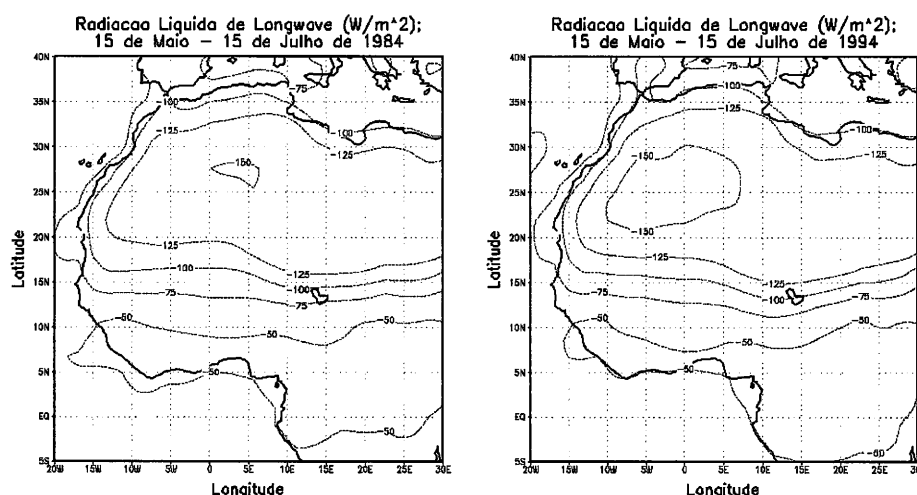


Figura 3.3.1.c.1: Fluxo de Radiação Resultante de Grandes Comprimentos de Ondas (W/m²), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

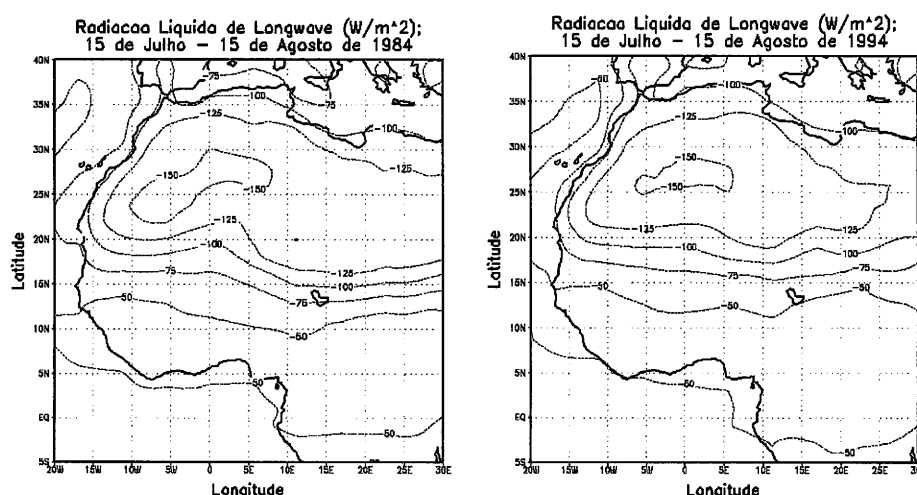


Figura 3.3.1.c.2: Fluxo de Radiação Resultante de Grandes Comprimentos de Ondas (W/m²), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

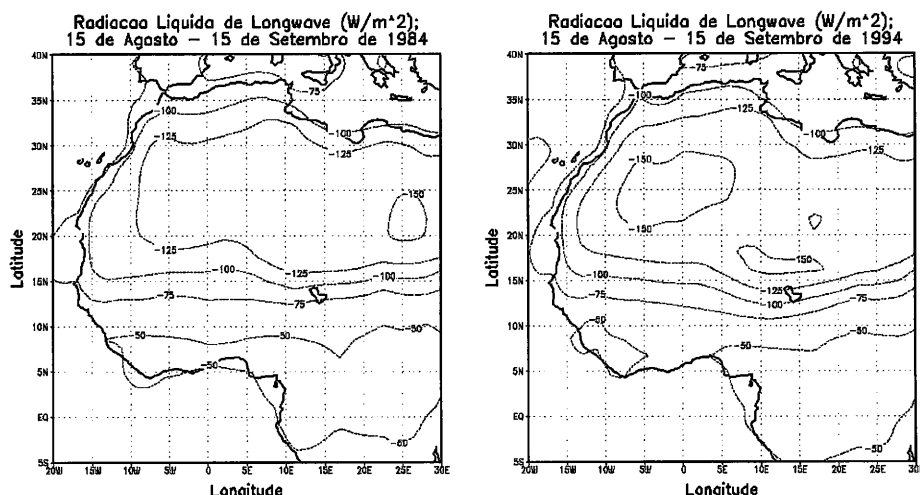


Figura 3.3.1.c.3: Fluxo de Radiação Resultante de Grandes Comprimentos de Ondas (W/m^2), no fim da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

O fluxo da radiação resultante de grande comprimento de onda (Longwave) apresenta valores negativos, o que reflecte a predominância da radiação emitida pela superfície em relação ao que entra vinda da atmosfera.

Comparando as figuras nos três períodos de actividade da monção, latitudinalmente, para os dois anos de referência, observam-se que os valores em 1994 são ligeiramente inferiores aos do 1984. Podemos concluir que durante o ano 1994 (ano chuvoso) a superfície emitiu menos em relação ao 1984 (ano seco).

d) Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente (LE) corresponde a quantidade de água evaporada por unidade do tempo (E) convertida em energia pela constante de vaporização da água (λ). L é o calor latente de vaporização da água, isto é, a quantidade de calor necessária para transformar um grama do líquido em vapor, a temperatura constante. O fluxo de calor latente é geralmente chamado de evapotranspiração porque resulta da evaporação da água presente nos espaços físicos (superfície do solo, água livre, folhas, etc.) mas também da transpiração das folhas (Luquet, 2002).

O fluxo do calor latente é dado pela expressão:

$$LE = \frac{\rho C_p}{\gamma} \frac{(es - ea)}{rs + ra} \quad 3.3.6$$

onde

γ = constante psicrométrica (66.1 Pa/K)

rs = resistência estomática, intervém no caso de uma cobertura vegetal

es = tensão do vapor de água da superfície (Pa)

ea = tensão do vapor de água do ar na vizinhança da superfície (Pa)

Para análise do fluxo do calor latente (figuras 3.3.1.d.1 e 3.3.1.d.3), comparam para 1984 e 1994, no início, intensificação e fim da monção, respectivamente.

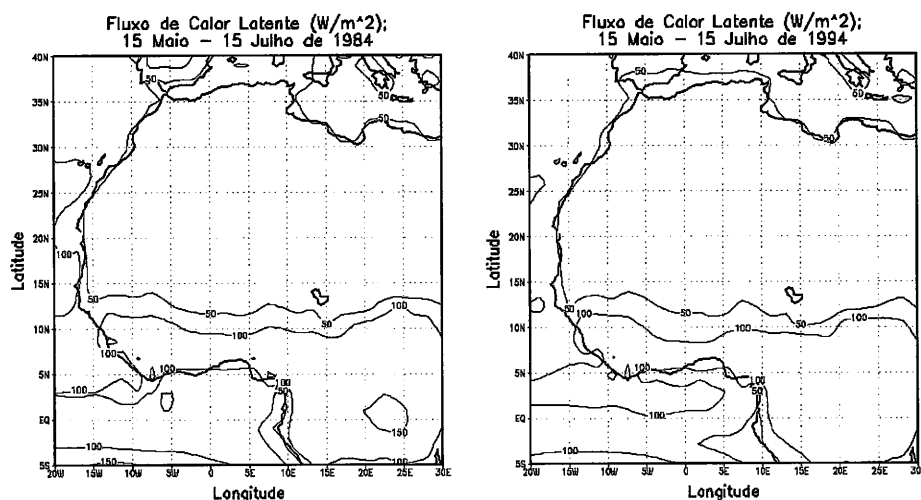


Figura 3.3.1.d.1: Fluxo do Calor Latente (W/m^2), no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente

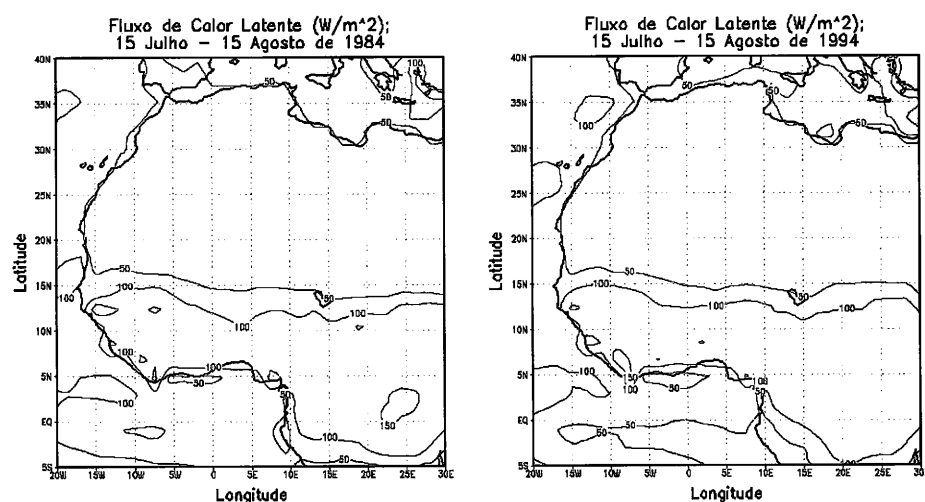


Figura 3.3.1.d.2: Fluxo do Calor Latente (W/m^2), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

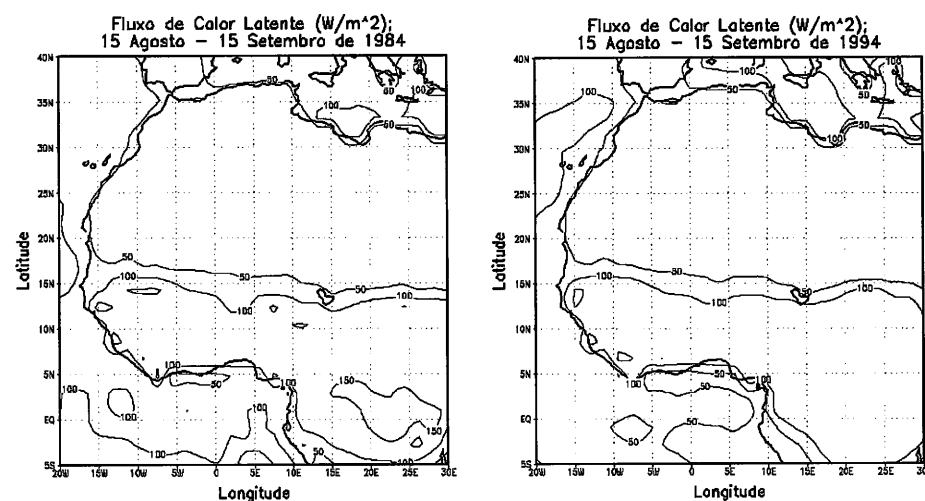


Figura 3.3.1.d.3: Fluxo do Calor Latente (W/m^2), no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Durante os três períodos nota-se uma progressão para norte do fluxo do calor latente o que indica a penetração da monção. Os máximos observam-se entre 5°N e 15°N de latitude, durante a fase do enfraquecimento da monção. É de salientar que durante esta fase, ainda se observam, na banda do Sahel, intensa actividade convectiva e a formação de linhas de borrascas com precipitações e tempestades vindas do interior do continente em direcção à costa. O padrão de configuração deste campo é praticamente idêntico entre 1984 e 1994; isto é, não se observam diferenças significativas entre os dois anos de referência.

e) Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível (H) corresponde a transferência do calor pela convecção entre a superfície e a atmosfera. Corresponde em média anual a 30 W/m² e contribui para aquecimento das camadas baixas de atmosfera a partir da superfície. As massas do ar aquecidas tornam-se mais leves e sobem na atmosfera (fenómeno da convecção). Este fenómeno assegura o transporte vertical de calor dos níveis baixos para os níveis altos da troposfera.

O fluxo do calor sensível é dado pela seguinte expressão:

$$H = \rho C_p \frac{(T_s - T_a)}{ra} \quad 3.3.7$$

onde

H = fluxo de calor sensível (W/m²)

ρC_p = capacidade calorífica do ar (1212 J/Kg.m)

ra = resistência aerodinâmica do ar (s/m)

T_s = temperatura da superfície considerada (°K)

T_a = temperatura do ar (°K), para nível de referência.

As Figuras 3.3.1.e.1, 3.3.1.e.2 e 3.3.1.e.3 apresentam o fluxo de calor sensível durante os anos de 1984 e 1994, nos períodos de início, de intensificação e do enfraquecimento da monção, respectivamente.

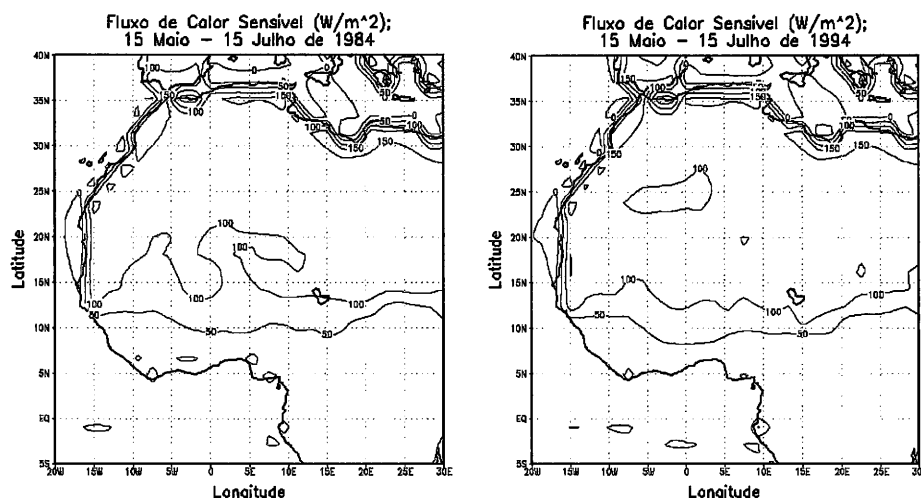


Figura 3.3.1.e.1: Fluxo de Calor Sensível (W/m²) no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

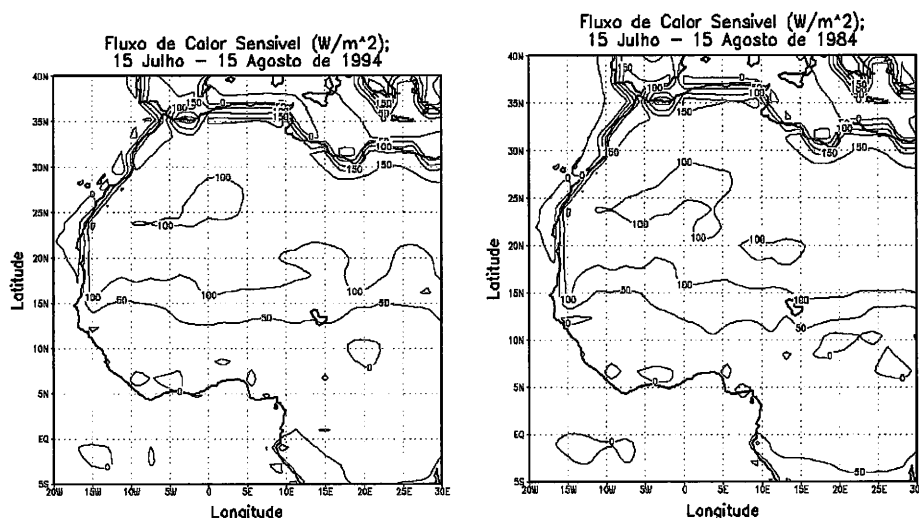


Figura 3.3.1.e.2: Fluxo de Calor Sensível (W/m^2) na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

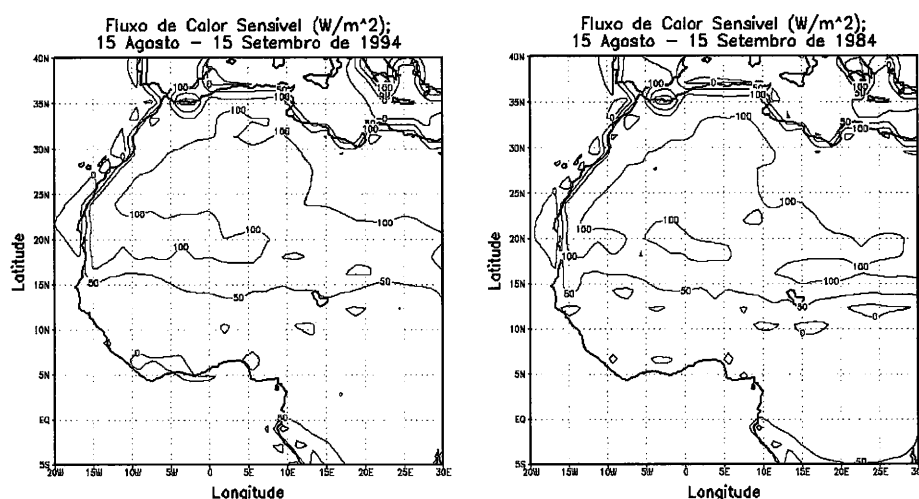


Figura 3.3.1.e.3: Fluxo de Calor Sensível (W/m^2) no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

As configurações dos campos do fluxo de calor sensível não apresentam diferenças significativas entre os dois anos de referência. No início da monção observam-se valores entre $50 W/m^2$ e $100 W/m^2$, a partir da latitude $10^\circ N$ até $20^\circ N$. Nos dois restantes períodos de actividade da monção nota-se que a isolinha $50 W/m^2$ se posiciona mais a norte, por volta dos $15^\circ N$. Esta configuração acompanha o deslocamento da ZCIT que em meados de Agosto atinge a posição mais a norte e em Setembro-Outubro começa a sua progressão em direcção ao sul.

f) Fluxo da energia estática húmida (ESH)

A energia estática húmida (ESH) representa o conteúdo energético de uma massa de ar (Philippon, 2002). Os trabalhos de Fontaine et al. (1999) mostram que o conhecimento da evolução dos gradientes da ESH na camada limite, no Sahel, é crucial para a evolução da monção. As previsões sazonais estatísticas e operacionais de valores acumulados de precipitação de Junho a Setembro, baseadas nos gradientes da ESH são muito encorajadoras (Philippon e Fontaine, 2000). O início da monção em Maio-Junho, o fluxo da

ESH é um factor essencial para o desenvolvimento de "upwelling" na costa do Golfo da Guiné. As retroacções positivas permitem um equilíbrio entre upwelling, o forçamento radiativo das nuvens e a circulação atmosférica, o que contribui para a manutenção da posição da ZCIT no continente Africano (Mitchell e Wallace, 1992; Waliser e Somerville, 1994; Philander et al., 1996). Os estudos teóricos de Plumb e Hou (1992), Emanuel et al., (1994), Emanuel (1995) e os diagnósticos de Eltahir e Gong (1996), mostram que a circulação da monção é fortemente dependente dos gradientes horizontais da energia estática húmida.

Na análise deste parâmetro, calculámos o fluxo da energia estática húmida aos 925hpa e 850hPa e traçamos os perfis verticais da divergência do fluxo da ESH para as regiões Oeste e Este

do Sahel para os anos de 1984 e 1994, nos períodos do início, intensificação e fim da monção no Sahel, respectivamente.

Começámos por definir a energia estática seca (s), dada pela expressão:

$$s = c_p T + gz \quad 3.3.8$$

onde

s = energia estática seca (J/kg)

c_p = calor específico a pressão constante (J/kg°K)

T = temperatura do ar (K)

g = aceleração de gravidade (m/s²)

z = altura geopotencial (mgp).

A energia estática húmida (ESH) é dada pela equação:

$$h = s + Lq \quad 3.3.9$$

onde

h = energia estática húmida (J/kg)

s = energia estática seca (J/kg)

L = calor latente de condensação (J/kg)

q = humidade específica (kg/kg)

O vento horizontal é definido como

$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} \quad 3.3.10$$

Onde u = componente zonal do vento (m/s); v = componente meridional do vento (m/s)

O transporte de energia estática húmida foi obtido com a seguinte expressão:

$$\vec{F}_h = hu\vec{i} + hv\vec{j} \quad 3.3.11$$

Ou seja

$$|\vec{F}_h| = h \times \sqrt{u^2 + v^2} \quad 3.3.11.a$$

Os fluxos zonal e meridional são dados pelas expressões:

$$Fh_{Zonal} = h \times u \quad e \quad Fh_{Merid.} = h \times v \quad 3.3.11.b$$

Onde F_h = Fluxo de energia estática húmida (J/m)

Por último, a divergência do fluxo de energia estática húmida é dada por:

$$\nabla \cdot \rho \vec{F}_h \quad 3.3.12$$

Onde ρ = densidade do ar (kg/m^3).

f.1) Fluxos meridionais da energia estática húmida aos 925hPa

As figuras 3.3.1.f.1, 3.3.1.f.2 e 3.3.1.f.3 ilustram os fluxos meridionais da energia estática húmida aos 925 hPa para 1984 e 1994, respectivamente.

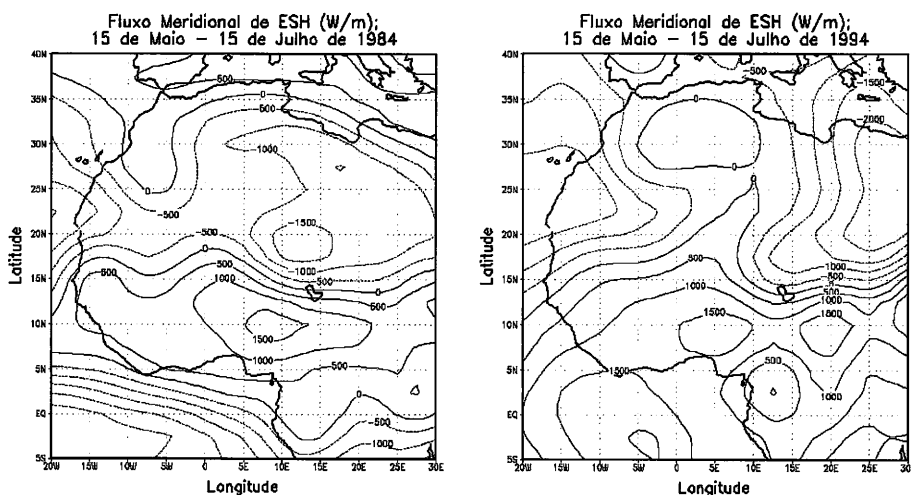


Figura 3.3.1.f.1 Fluxo Meridional de Energia Estática Húmida (W/m) no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

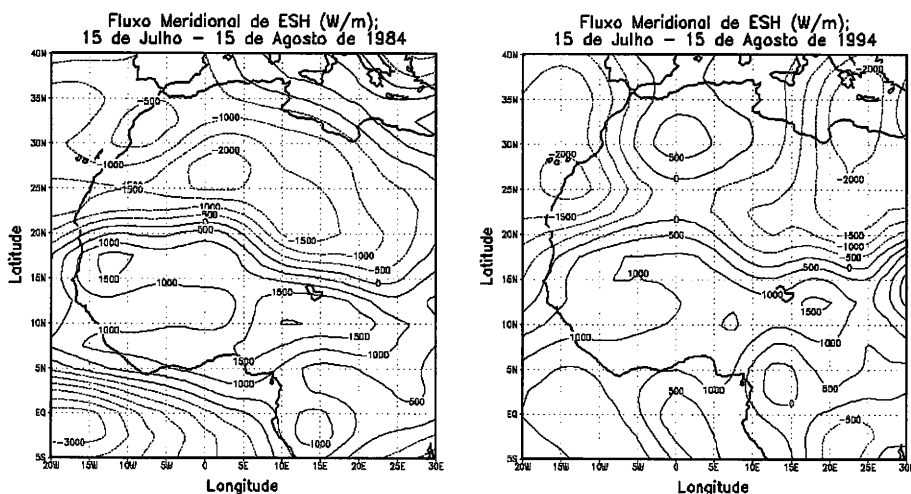


Figura 3.3.1.f.2: Fluxo Meridional de Energia Estática Húmida (W/m), na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

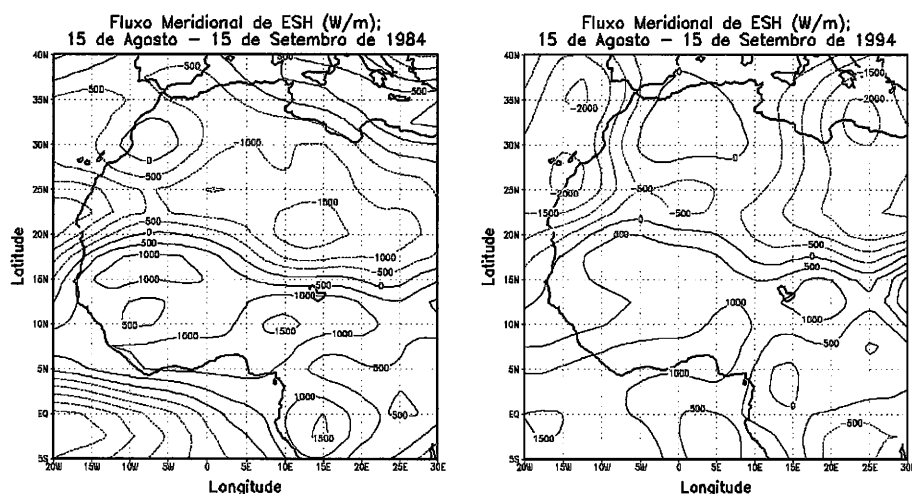


Figura 3.3.1.f.3: Fluxo Meridional de Energia Estática Húmida (W/m) no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Os valores negativos indicam transportes em direcção a Sul e os valores positivos indicam transportes em direcção a Norte. Estes campos permitem localizar a posição média da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) à superfície. Nos períodos analisados, os campos do fluxo meridional da ESH a 925 hPa ilustram a progressão da zona de confluência dos alísios para norte, atingindo a posição mais a norte em Agosto - Setembro. Em 1994 (ano chuvoso) nota-se uma penetração mais intensa para norte no interior do continente em relação ao ano de 1984 (ano seco), praticamente em todos os períodos de actividade da monção.

g) Perfis Verticais Médios da Divergência do Fluxo Meridional de Energia Estática Húmida, no Sahel-Oeste e no Sahel-Este

As figuras 3.3.1.g.1 a 3.3.1.g.3 representam os perfis verticais médios de divergência do fluxo de energia estática húmida no Sahel: Sahel-Oeste e Sahel-Este; nos períodos de início, da intensificação e do enfraquecimento da monção, respectivamente. Os valores positivos (+) indicam a divergência e os valores negativos (-) indicam convergência. Convergência em baixos níveis implica movimentos ascendentes do ar, o que favorece a formação das nuvens convectivas; pelo contrário, divergência em níveis baixos é um mecanismo inibidor da formação das nuvens com capacidades convectivas.

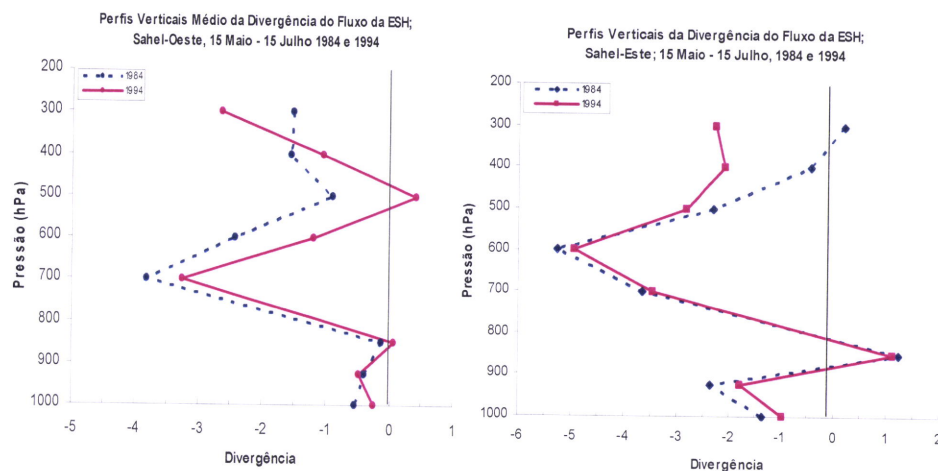


Figura 3.3.1.g.1: Perfis Verticais Médio da Divergência do Fluxo da ESH, Sahel-Oeste e Sahel-Este, 15 Maio - 15 Julho para 1984 e 1994, respectivamente.

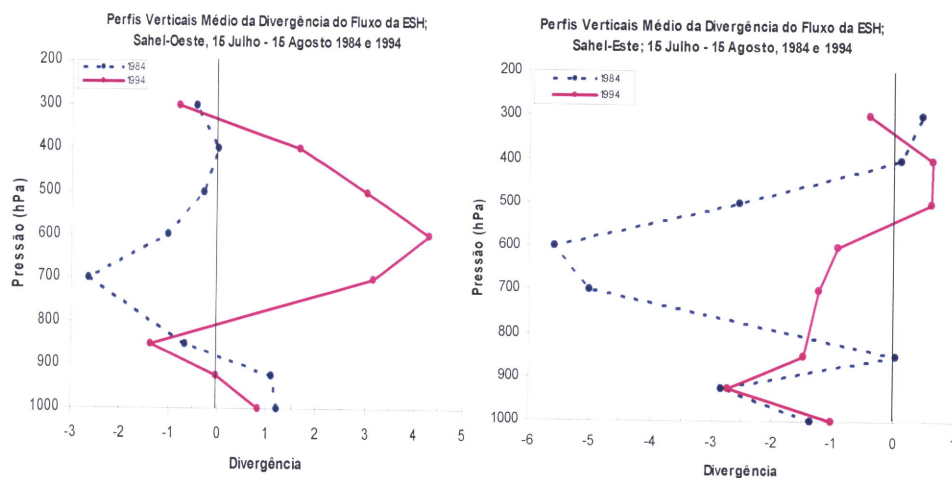


Figura 3.3.1.g.2: Perfis Verticais Médio da Divergência do Fluxo da ESH; Sahel-Oeste e Sahel-Este, 15 Julho - 15 Agosto para 1984 e 1994, respectivamente.

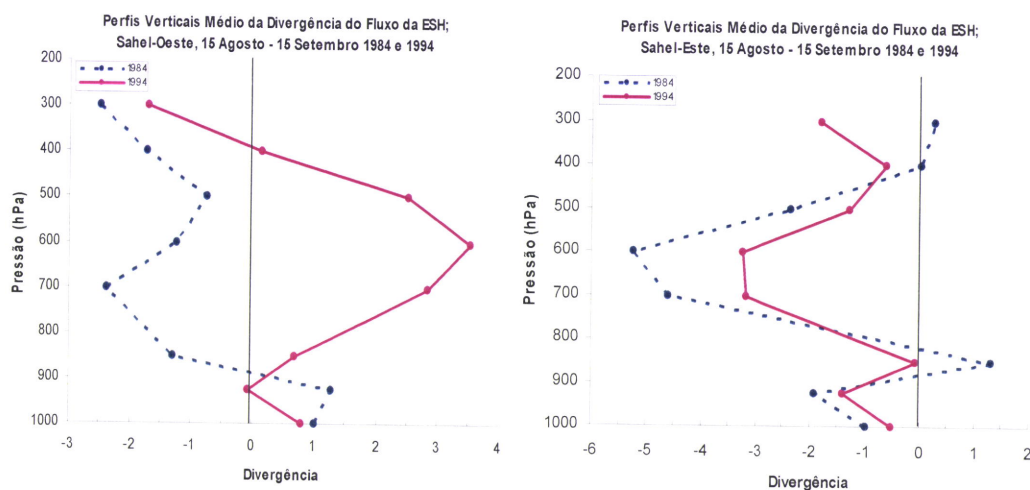


Figura 3.3.1.g.3: Perfis Verticais Médio da Divergência do Fluxo da ESH, Sahel-Oeste e Sahel-Este, 15 Agosto - 15 Setembro para 1984 e 1994, respectivamente.

- No período do início da monção, 15 de Maio a 15 de Julho (figura 3.3.1.g.1), tanto para a região Oeste como para a região Este do Sahel e em ambos os anos de referência (1984 e 1994), observaram-se

condições de convergência nos baixos níveis, o que traduz a possibilidade de convecção e formação de nuvens. Na parte Este esta convergência nos baixos níveis é mais pronunciada do que na parte Oeste.

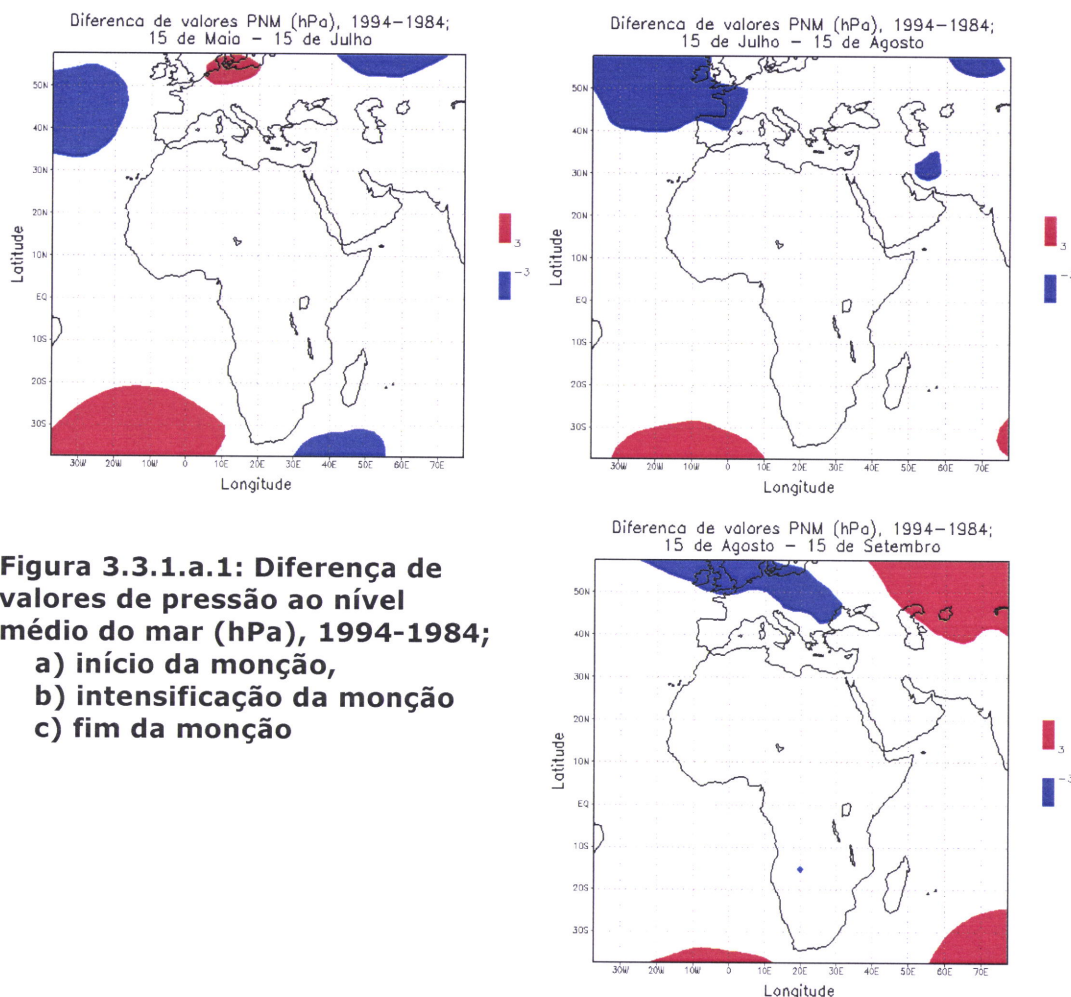
- No período da intensificação da monção, 15 de Julho a 15 de Agosto (figura 3.3.g.2), nota-se situações diferentes entre a região Oeste, onde se registou divergência nos baixos níveis, e a região Este, onde se pode constatar convergência nos baixos níveis.

Ainda neste período, a situação na região Oeste difere entre 1984 e 1994: Em 1994 a situação de divergência observada a partir dos 1000 hPa inverteu-se em 925 hPa passando para uma situação de convergência ainda nos baixos níveis até aproximadamente 825 hPa. A partir deste nível passou outra vez a ser uma divergência já nos níveis médios da troposfera. Em 1984, situação de divergência observada entre 1000 e 925 hPa, passou a convergência em 850 hPa e acima deste nível. Podemos concluir que 1994, durante o período da intensificação da monção, o fluxo da monção tinha as condições mais favoráveis a convecção e formação de nuvens precipitantes do que em 1984.

- No período do fim da monção, 15 de Agosto a 15 de Setembro (figura 3.3.g.3), a situação na região Oeste nos baixos níveis é da divergência para ambos os anos de referência (1984 e 1994); enquanto que para região Este a situação é de convergência nos baixos níveis para ambos os anos de referência. Esta situação reflecte o fim precoce de chuvas na região Oeste do Sahel e em parte a persistência dos deficits pluviométricos que se registam ainda nos últimos anos na parte Oeste do Sahel, apesar de condições pluviométricas terem melhorados na região Sul e Este do Sahel.

3.3.2. Parâmetros Dinâmicos

a) Pressão ao nível médio do mar



Diminuição de pressão (aproximação de um centro de baixa pressão) pode indicar condições favoráveis ao aumento da instabilidade na atmosfera, o que favorece a formação de nuvens e a ocorrência da precipitação, enquanto que aumento de pressão (aproximação de um centro de alta pressão) desfavorece a formação de nuvens precipitantes.

A figura 3.3.2.a.1 apresenta campos de diferença de valores de pressão ao nível médio do mar (1994-1984), para os períodos do início, intensificação e enfraquecimento ou fim da monção no Sahel. Ficou patente um enfraquecimento da Alta dos Açores de -5 hPa em 1994 em relação a 1984 e uma relativa intensificação do Anticiclone de Santa Helena de +5 hPa em 1994 em relação a 1984; o que favoreceu a intensificação da monção em 1994 (ano húmido no Sahel) em relação ao 1984 (ano seco no Sahel).

b) Vento e Altura Geopotencial

b.1) Vento e Altura Geopotencial aos 925 hPa

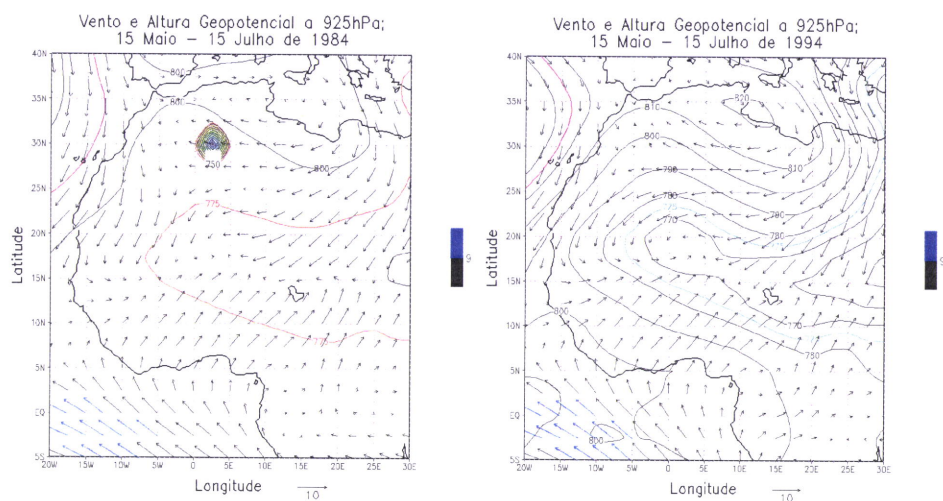


Figura 3.3.2.b.1.1: Campos do vento(m/s) e da altura geopotencial (mcp) aos 925 hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

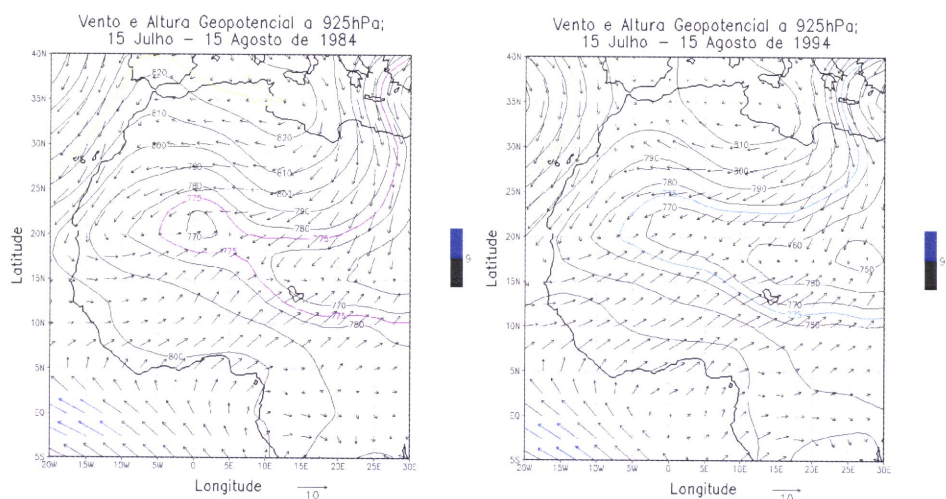


Figura 3.3.2.b.1.2: Campos do vento(m/s) e da altura geopotencial (mcp) aos 925 hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

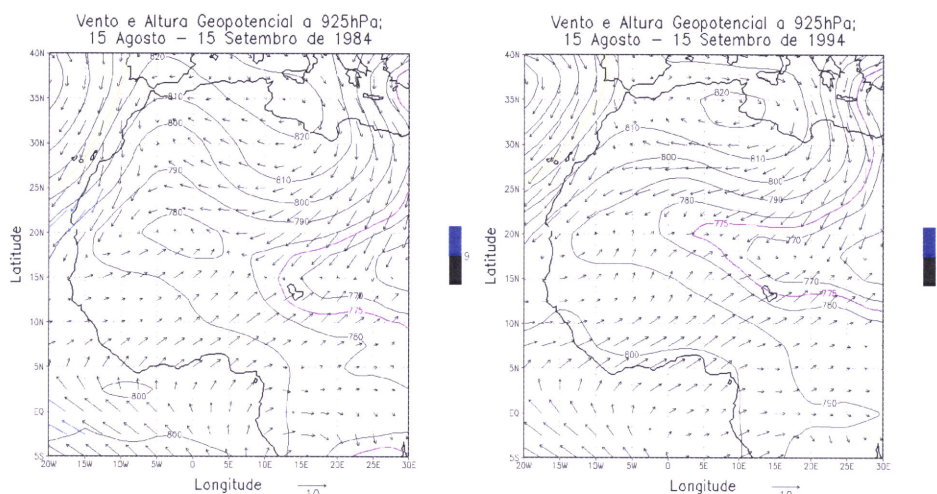


Figura 3.3.2.b.1.3: Campos do vento(m/s) e da altura geopotencial (mgp) aos 925 hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

b.2) Vento e Altura Geopotencial aos 850 hPa

As figuras 3.3.2.c.2.1 a 3.3.2.c.2.3 representam os campos do vento e da altura geopotencial ao nível 850 hPa, para os períodos do início, da intensificação e do enfraquecimento da monção no Sahel, nos anos de 1984 (ano seco) e 1994 (ano chuvoso).

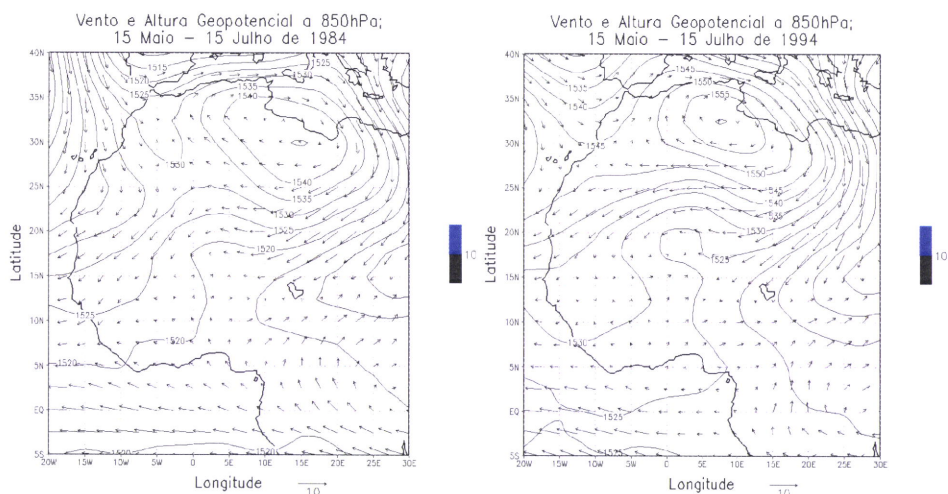


Figura 3.3.2.b.2.1: Campos do vento(m/s) e da altura geopotencial (mgp) aos 850 hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

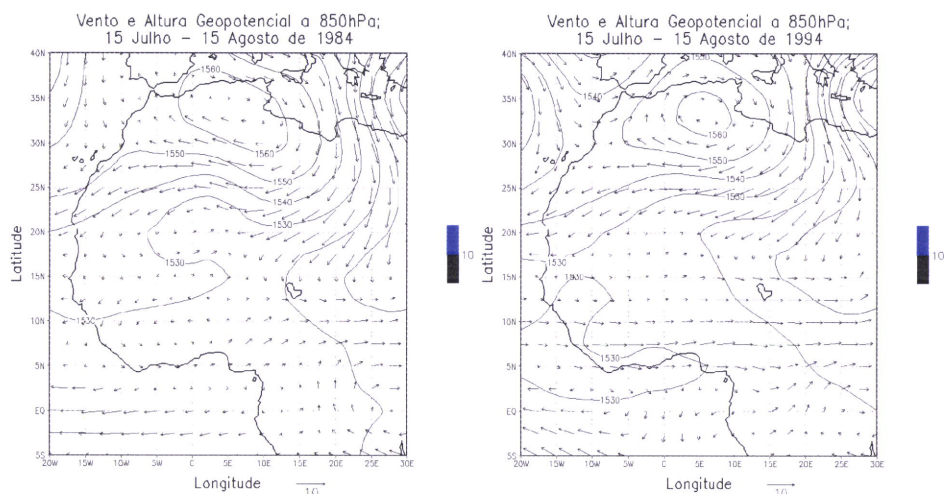


Figura 3.3.2.b.2.2: Campos do vento (m/s) e da altura geopotencial (mvp) aos 850 hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

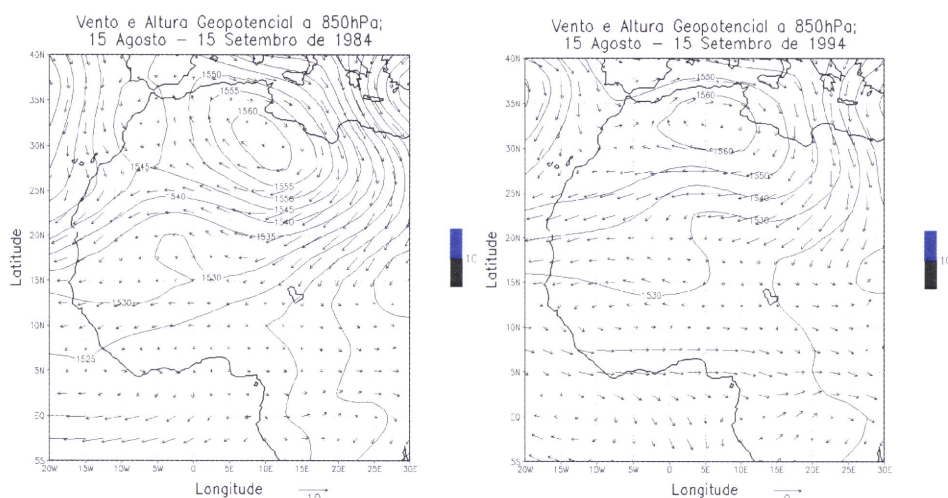


Figura 3.3.2.b.2.3: Campos do vento (m/s) e da altura geopotencial (mvp) aos 850 hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Comparando os resultados obtidos dos campos do vento e da altura geopotencial nos períodos de início, de intensificação e do fim da monção, entre 1984 e 1994, observam-se que o centro de alta pressão da Líbia, é mais intenso em 1984 do que em 1994 e posicionou-se mais a Oeste e mais a Norte entre 30°N à 35°N, gerando ventos de Nordeste entre as latitudes 15°N e superiores e com ventos de Leste nas latitudes mais baixas. Esta situação opõe-se e/ou dificulta a penetração da monção para o continente; isto é, a zona de confluência dos alísios ou o posicionamento da zona de convergência intertropical (ZCIT) tende-se a ficar mais a Sul do que normal, o que tem influência directa sobre a precipitação.

b.3) Vento e Altura Geopotencial aos 600 hPa

As figuras 3.3.2.b.3.1 à 3.3.2.b.3.3 representam as comparações dos campos do vento e da altura geopotencial aos 600 hPa, para os períodos do início, da intensificação e do enfraquecimento da monção no Sahel, nos anos de 1984 (ano seco) e 1994 (ano chuvoso).

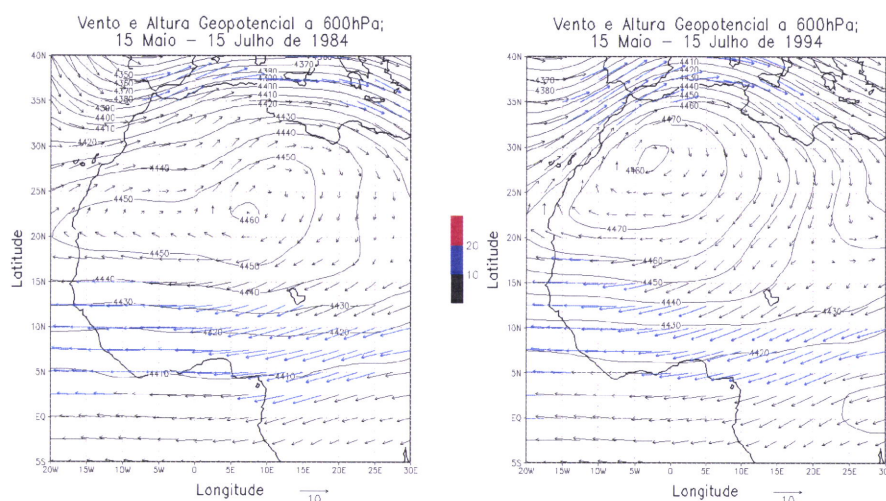


Figura 3.3.2.b.3.1: Campos do vento (m/s) e da altura geopotencial (mvp) aos 600 hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

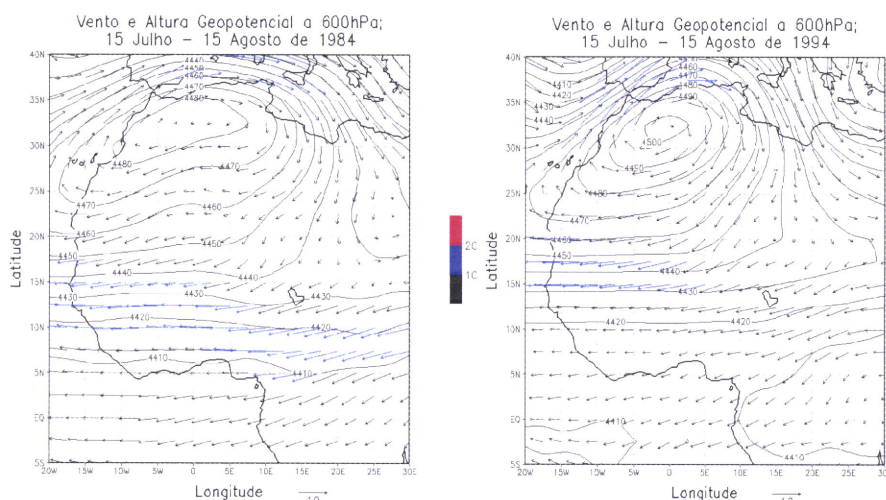


Figura 3.3.2.b.3.2: Campos do vento (m/s) e da altura geopotencial (mvp) aos 600 hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

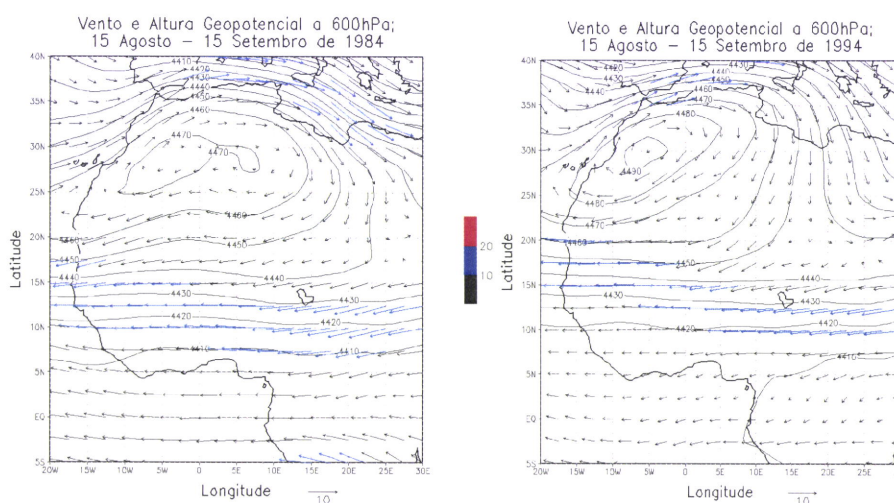


Figura 3.3.2.b.3.3: Campos do vento (m/s) e da altura geopotencial (mvp) aos 600 hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Os campos do vento e da altura geopotencial aos 600 hPa permitem destacar a posição de Jacto de Africano de Este e sua deslocação com o tempo.

No início da monção, 15 de Maio a 15 de Julho (figura 3.3.2.b.3.1), observam-se que o centro de acção (alta pressão) que se localiza em 1984 no centro do continente entre 20°N e 25°N; 5°E e 10°E, tornou-se mais intensa em 1994 e deslocou-se mais a Norte e mais a Oeste, ocupando a posição entre 30°N e 35°N de latitude; 5°W e 0° de longitude. O JAE localizado entre 5°N e 15°N em ambos anos de referência é mais intenso em 1984 do que em 1994, o que pode ter como consequência a perturbação e/ou dificultado a penetração da fluxo da monção em 1984 relativamente a 1994.

No período da intensificação da monção, 15 de Julho a 15 de Agosto (figura 3.3.2.b.3.2), como no período do início da monção, o centro de alta pressão é mais intensa em 1994 em relação a 1984, gerando fortes ventos do sector Nordeste. Nota-se que o JAE esta posicionado mais a norte em 1994 do que em 1984. o JAE é mais intensa em 1984 do que em 1994 o que significa que nos níveis baixos o fluxo de sudoeste provavelmente deve ser mais fraco em 1984 em relação a 1994.

No fim da monção no Sahel, 15 de Agosto a 15 de Setembro (figura 3.3.2.b.3.3), a circulação zonal de Este para Oeste, entre 10°N e 20°N de latitude, é mais intensa em 1984 do que em 1994. O centro de alta é mais intenso em 1994 e posicionou-se mais a costa dos Marocos do que em 1984.

Nos três períodos da evolução da monção podemos concluir que a situação na média troposfera (600 hPa) da dinâmica da atmosfera que influencia a variação interna da monção oeste africana, nomeadamente o Jacto Africano de Este (JAE), tem sido mais intensa em 1984 relativamente a 1994.

b.4) Vento e Altura Geopotencial aos 200 hPa

As figuras 3.3.2.b.4.1 a 3.3.2.b.4.3 apresentam as comparações dos campos do vento e da altura geopotencial na alta troposfera (200hPa), para os períodos do início, intensificação e enfraquecimento da monção no Sahel, nos anos de 1984 (ano seco) e 1994 (ano chuvoso).

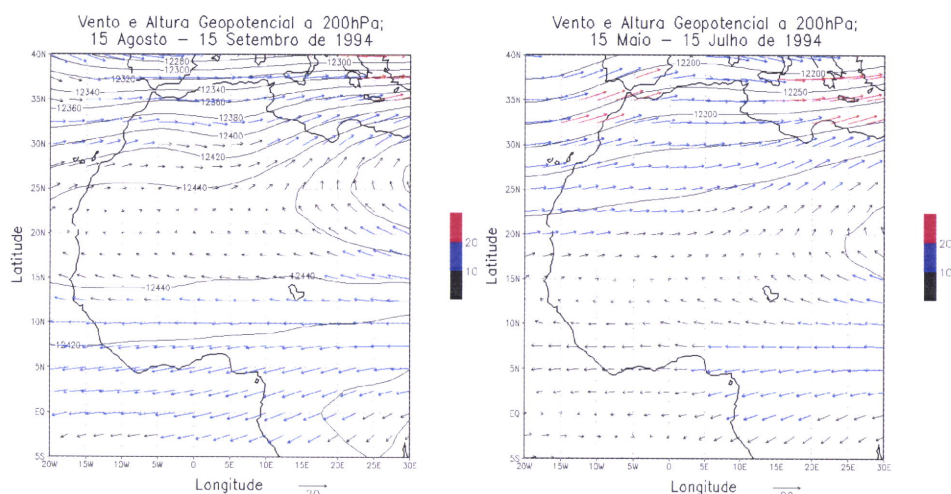


Figura 3.3.2.b.4.1: Campos do vento (m/s) e da altura geopotencial (mvp) aos 200 hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

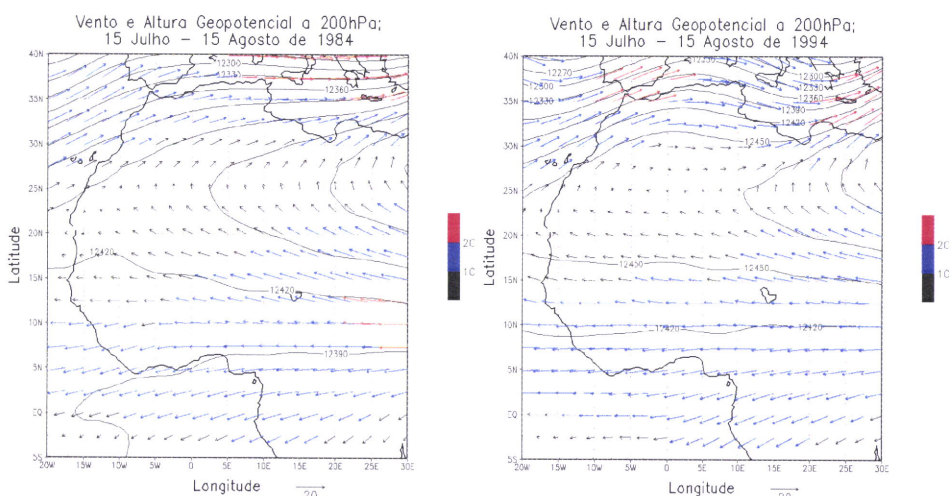


Figura 3.3.2.b.4.2: Campos do vento (m/s) e da altura geopotencial (mvp) aos 200 hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

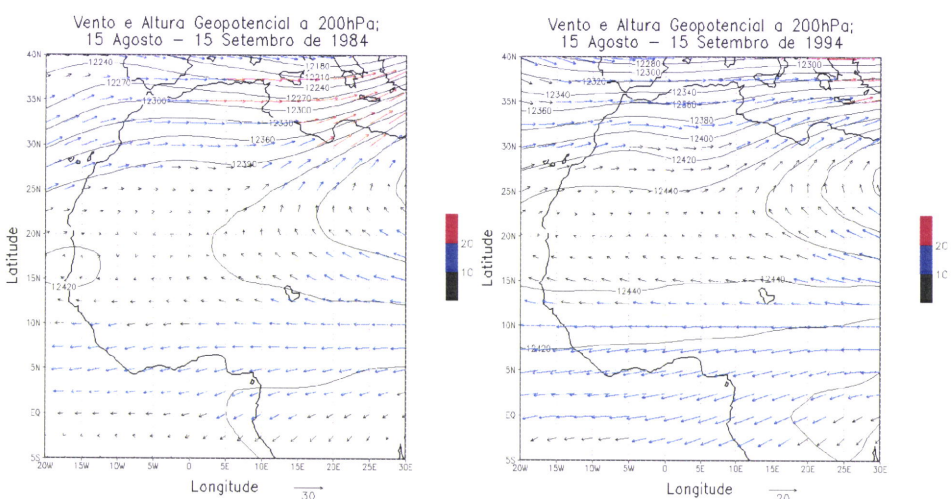


Figura 3.3.2.b.4.3: Campos do vento (m/s) e da altura geopotencial (mvp) aos 200 hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Na alta troposfera (200hPa) destaca-se a presença do Jacto de Oeste Subtropical (JOST) entre 30°N e 40°N de latitude durante as três fases da evolução da monção oeste africana.

No início da monção, 15 de Maio a 15 de Julho (figura 3.3.2.b.4.1), o JOST é mais intenso em 1994 do que em 1984. Comparando os valores da altura geopotencial, nota-se que em 1994 registou-se valores superiores do que em 1984.

No período de intensificação da monção, 15 de Julho a 15 de Agosto (figura 3.3.2.b.4.2), tal como no período anterior, os valores do geopotencial continuam a ser superiores em 1994 em relação a 1984. Neste período, pelos vistos o JOST é mais intenso em 1994 em relação a 1984. Neste período em ambos os anos de referência, observam-se nas baixas latitudes (do Equador até 10°N) um fluxo de Leste.

No fim da monção no Sahel, 15 de Agosto a 15 de Setembro (figura 3.3.2.b.4.3), o JOST é mais intenso em 1984 em relação a 1994; mas os valores da altura geopotencial continuam a ser mais elevados em 1994 do que em 1984.

Pode-se concluir que na alta troposfera, o Jacto de Oeste Subtropical (JOST) que é o sistema associado a variação interna da monção oeste africana foi mais intenso em 1994 comparativamente a 1984.

c) Velocidade Vertical do Vento - Ómega (Pa/s)

As figuras 3.3.2.c.1, 3.3.2.c.2 e 3.3.2.c.3 apresentam comparações dos perfis médios do campo da velocidade vertical do vento (ómega), para os períodos do início, intensificação e fim da monção no Sahel-Oeste e Sahe-Este para os anos de 1984 (ano seco) e 1994 (ano chuvoso), respectivamente.

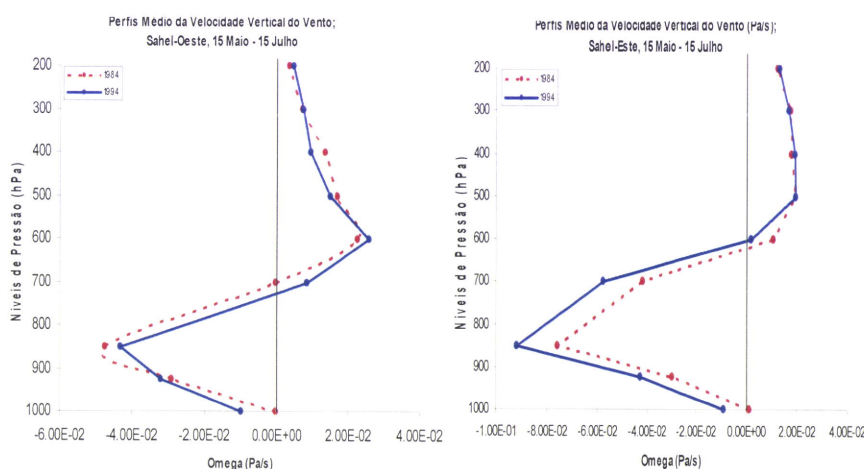


Figura 3.3.2.c.1: Perfis Médio da Velocidade Vertical do Vento (Pa/s), Sahel-Oeste e Sahel-Este no período do início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

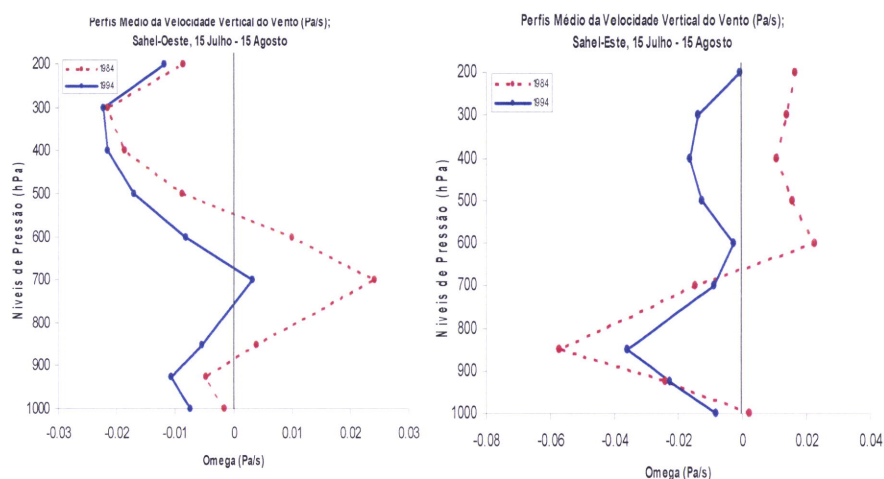


Figura 3.3.2.c.2: Perfis Médio da Velocidade Vertical do Vento (Pa/s) no Sahel-Oeste e Sahel-Este, no período de intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

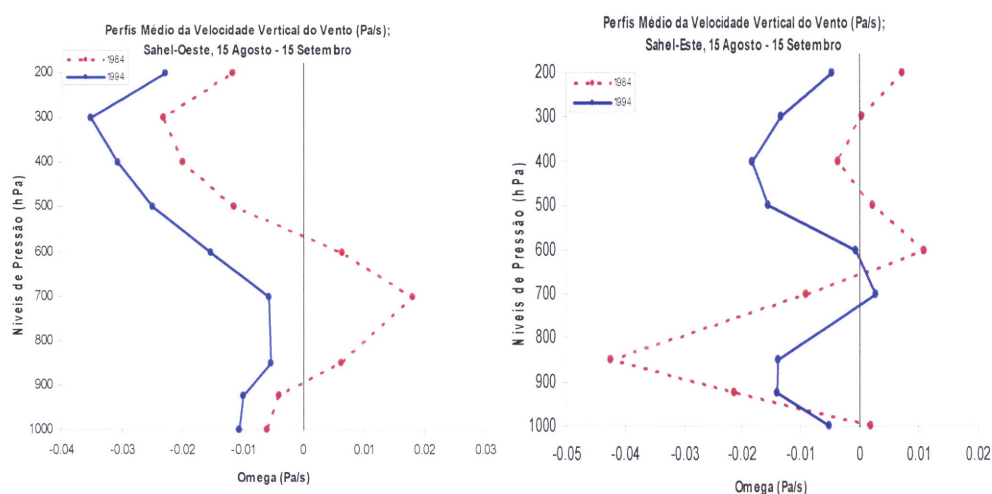


Figura 3.3.2.c.3: Perfis Médio da Velocidade Vertical do Vento (Pa/s) para Sahel-Oeste e Sahel-Este no período do enfraquecimento da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Analisando os perfis médios da velocidade vertical do vento, nos três períodos da evolução da monção: início da monção, 15 de Maio a 15 de Julho (figura 3.3.2.c.1); intensificação da monção (figura 3.3.2.c.2) e fim da monção (figura 3.3.2.c.3), observam-se na baixa troposfera, em ambas as regiões do Sahel (Oeste e Este) e em ambos anos de referência (1984 e 1994), valores negativos da ômega que corresponde movimentos ascendentes do ar. Na média-alta troposfera, registam-se valores positivos do ômega, bem marcante em 1984 durante os três períodos, situação que em 1994 só se verificou no início da monção, o que traduz uma situação anómala.

As regiões de movimento ascendente estão sempre associadas a instabilidade atmosférica, ou seja, áreas favoráveis ao desenvolvimento de nuvens.

d) Cisalhamento do Vento

d.1) Cisalhamento do Vento (200 – 500hPa)

O cisalhamento vertical do vento na camada 200-500hPa é calculado pela diferença entre o módulo do vento horizontal aos 200 e 500hPa. Esta grandeza é muito importante na determinação de tipos de tempestade e no potencial da severidade da tempestade. Tempestades que ocorrem com cisalhamento vertical fraco são poucas intensas e de pouca duração, enquanto que tempestades com valores altos de cisalhamento podem ser mais severas e ter uma duração maior.

As figuras 3.3.2.d.1.1, 3.3.2.d.1.2 e 3.3.2.d.1.3 representam os campos do cisalhamento do vento na camada 200 - 500 hPa, para os anos de 1984 e 1994, nos períodos do início, intensificação e fim da monção no Sahel, respectivamente.

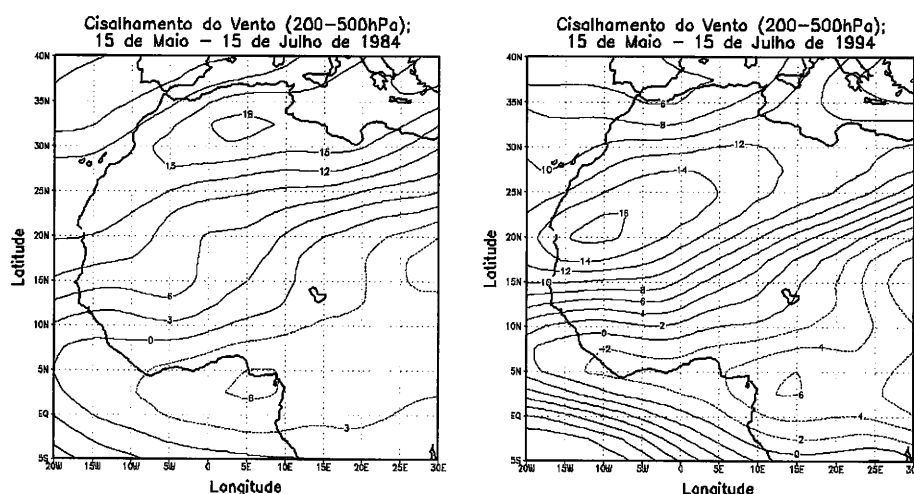


Figura 3.3.2.d.1.1: Cisalhamento do vento (m/s) na camada 200-500hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

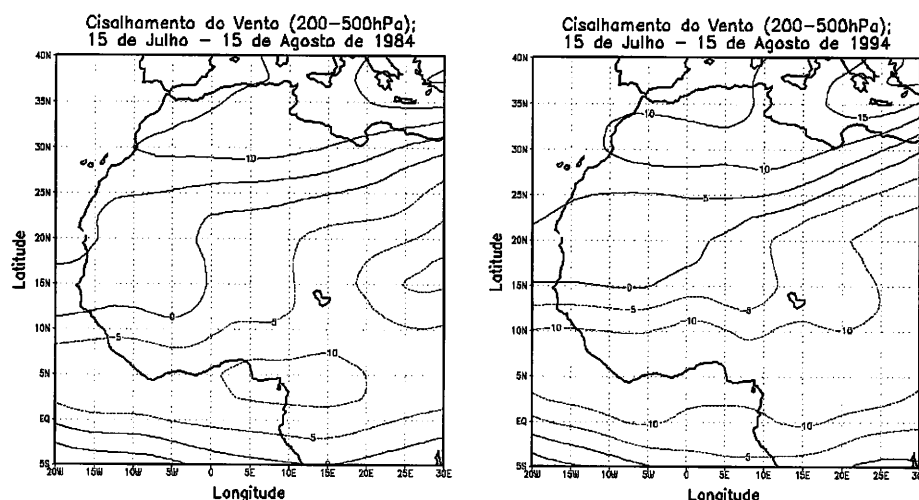


Figura 3.3.2.d.1.2: Cisalhamento do vento (m/s) na camada 200-500hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

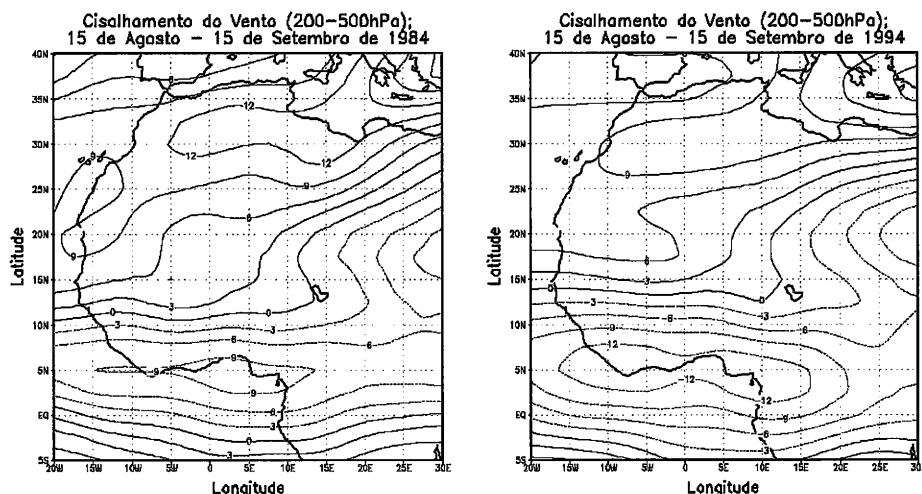


Figura 3.3.2.d.1.3: Cisalhamento do vento (m/s) na camada 200-500hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Comparando os dois anos de referência, observa-se que o cisalhamento do ar entre 200hPa e 500hPa é mais forte em 1994 em relação a 1984. Esta situação pode explicar a maior severidade das tempestades em 1994 em relação a 1984.

d.2) Cisalhamento do vento (700 – 925 hPa)

O cisalhamento vertical do vento na camada 700 - 925 hPa é calculado pela diferença entre o módulo do vento horizontal aos 700 e 925 hPa. Representa a variação dos ventos nos níveis baixos da troposfera. Tanto a mudança da velocidade do vento, como a mudança da direcção do vento com a altitude são bons indicadores de tempestade severa. Valores altos de cisalhamento em baixos níveis são favoráveis à formação de tempestades intensas com duração de menos de um dia e, em alguns casos, de tornado.

As figuras 3.3.2.d.2.1, 3.3.2.d.2.2 e 3.3.2.d.2.3 representam os campos de cisalhamento do vento na camada 700 - 925 hPa para os anos de 1984 e 1994, nos períodos de início, intensificação e fim da monção no Sahel, respectivamente.

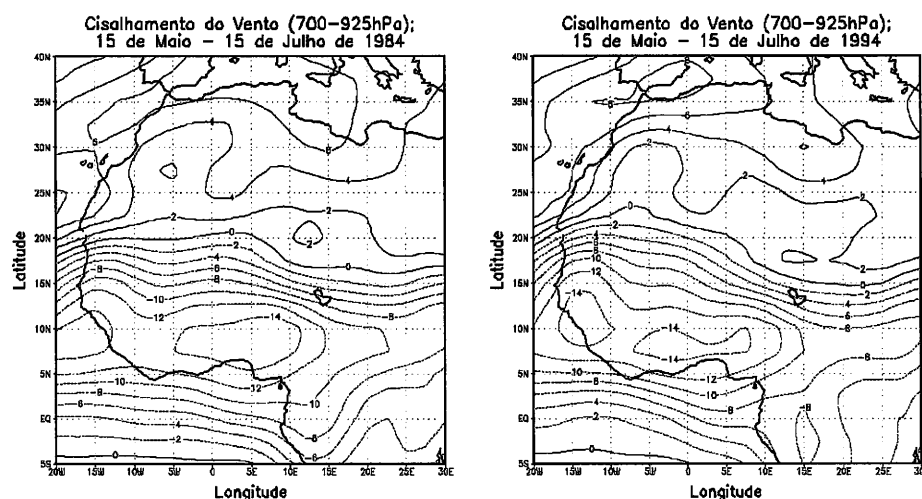


Figura 3.3.2.d.2.1: Cisalhamento do vento (m/s) na camada 700-925 hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

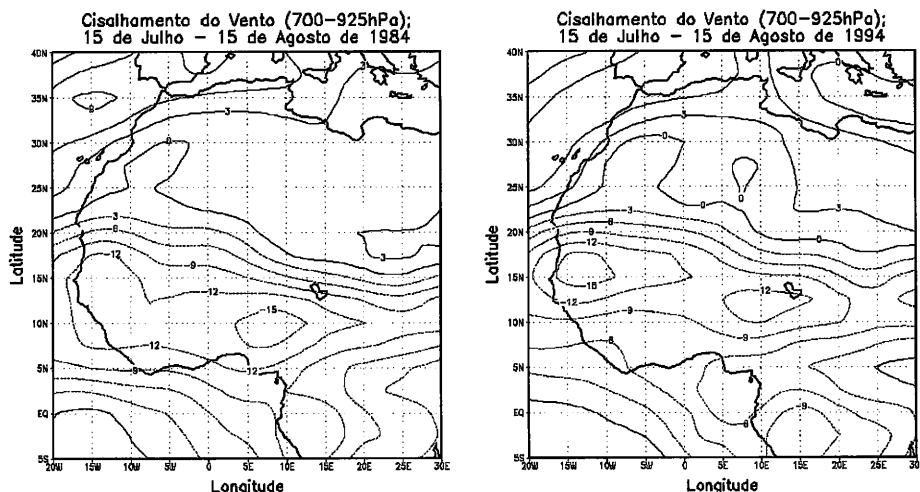


Figura 3.3.2.d.2.2: Cisalhamento do vento (m/s) na camada 700-925 hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

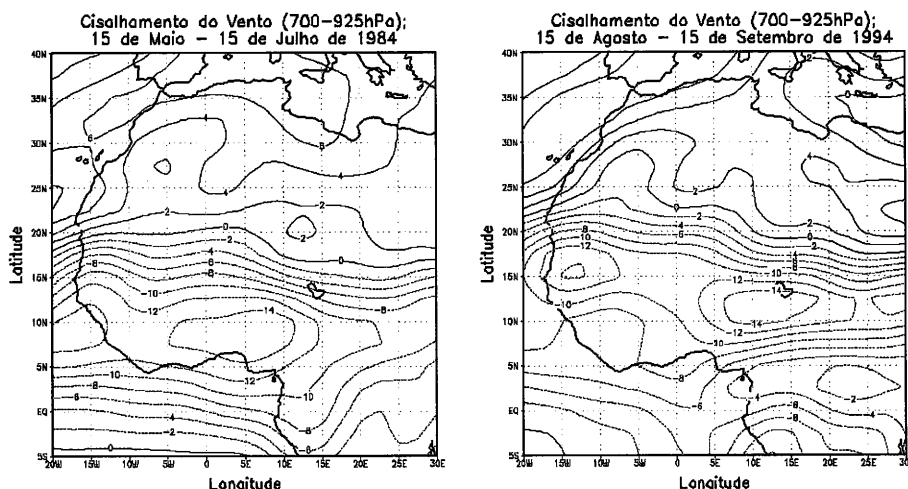


Figura 3.3.2.d.2.3: Cisalhamento do vento (m/s) na camada 700-925 hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Tal como na alta troposfera (200-500hPa), o cisalhamento do vento na baixa troposfera 925-700hPa é mais intenso em 1994 do que em 1984. Esta situação favoreceu a ocorrência de tempestades mais intensa em 1994 (ano chuvoso) relativamente a 1984 (ano seco).

3.3.3) Parâmetros Hidrométricos (Temperatura, Humidade e Precipitação)

a) Temperatura do ar aos 850 hpa

A superfície terrestre é o principal receptor da energia solar que incide sobre a Terra, porque o ar tem uma capacidade muito pequena de absorver directamente a radiação. O aquecimento resulta, principalmente, do balanço de radiação junto à superfície. O solo transfere calor para o ar por condução. Como o ar aquecido é menos denso do que o ar frio, criam-se correntes de convecção ascendentes que transportam o calor para as partes mais altas da atmosfera e contribuem também para o transporte da humidade.

A capacidade do ar atmosférico de conter a humidade é directamente proporcional a sua temperatura. Esta é uma das principais propriedades do ar atmosférico. Quanto maior for a temperatura do ar, maior é a quantidade do vapor de água que poderá conter.

As figuras 3.3.3.a.1, 3.3.3.a.2 e 3.3.3.a.3 representam comparações dos campos de temperatura ao nível 850 hPa, nos anos de referência (1984 – ano seco e 1994 – ano chuvoso), no início, intensificação e fim da monção no Sahel, respectivamente.

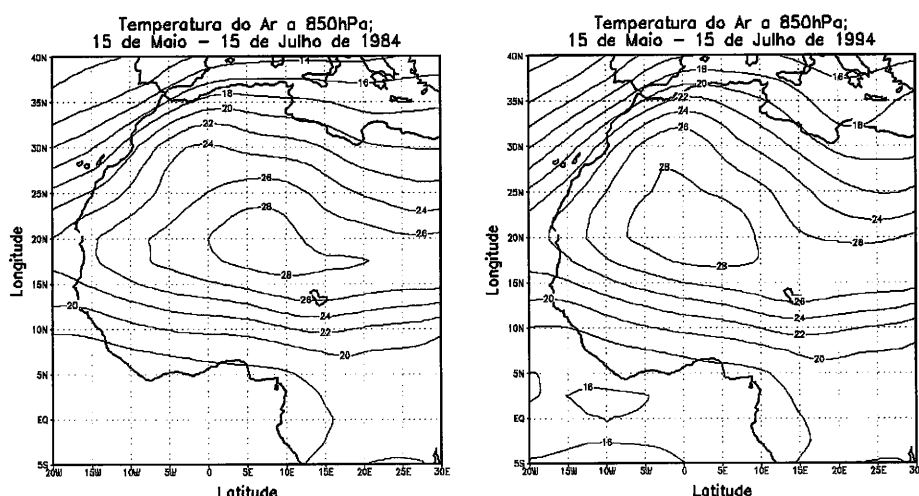


Figura 3.3.3.a.1: Temperatura do ar aos 850hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

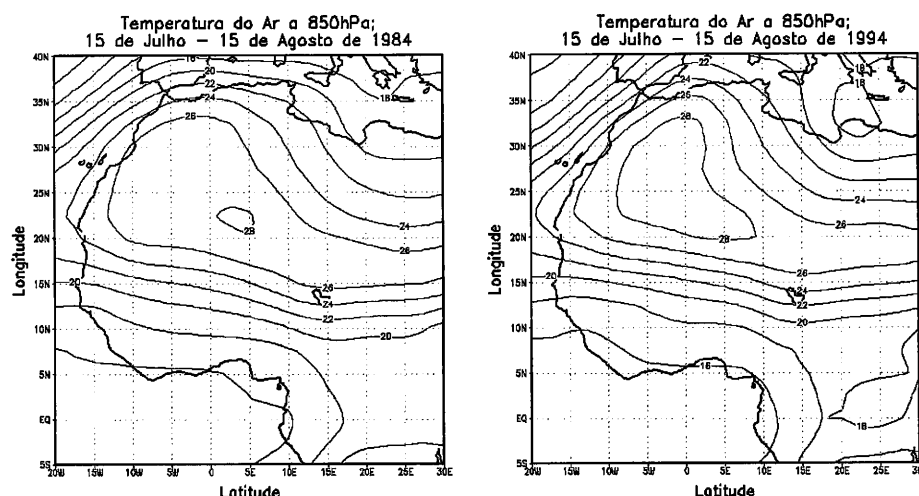


Figura 3.3.3.a.2: Temperatura do ar aos 850hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

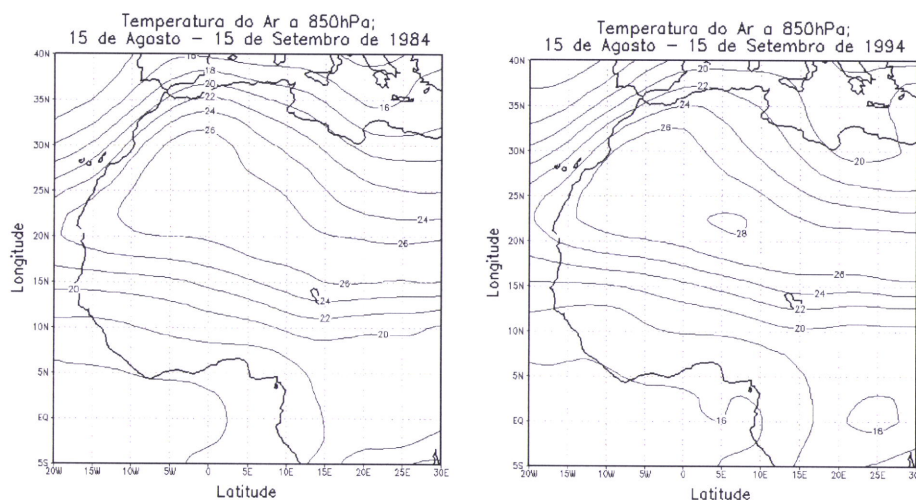


Figura 3.3.3.a.3: Temperatura do ar aos 850hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Nos períodos da evolução da monção, durante os dois anos de referência, ao nível 850hPa, observa-se que o ano de 1984 registou valores mais elevados de temperatura em relação ao ano de 1994.

b) Anomalias da Temperatura da Superfície da Água do Mar (°C)

Os campos de anomalias de temperaturas da superfície da água do mar (SST) estão representados nas figuras 3.3.3.b.1, 3.3.3.b.2 e 3.3.3.b.3, para os períodos do início, da intensificação e do fim da monção no Sahel, nos anos de 1984 e 1994.

As temperaturas da superfície da água do mar (SST) tem uma importância na interação oceano-atmosfera, porque influencia de forma bastante significativa ao estado termico do ar atmosférico. No caso de SST mais fria, pode resultar na formação de nevoeiro. Quanto SST é mais quente pode intensificar os processos convectivos, causando temporais e, até mesmo, o desenvolvimento dos ciclones tropicais e furacões (quando SST é superior a 27°C).

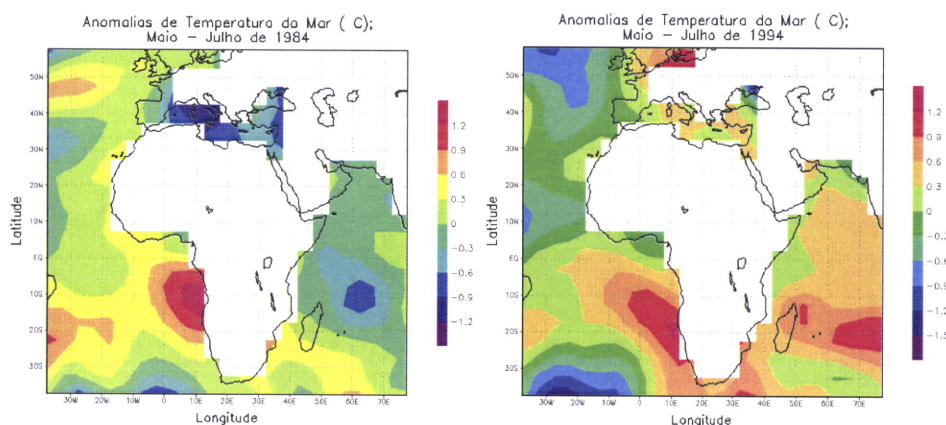


Figura 3.3.3.b.1: Anomalias de temperatura da superfície da água do mar, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

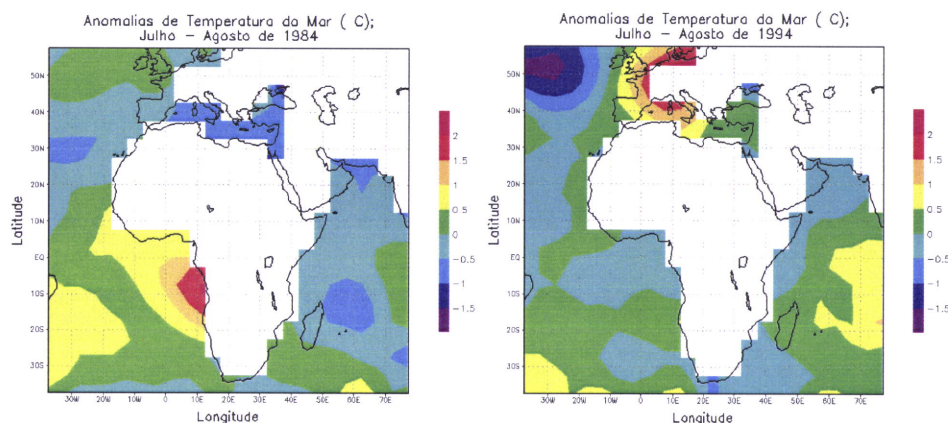


Figura 3.3.3.b.2: Anomalias de temperatura da superfície da água do mar, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

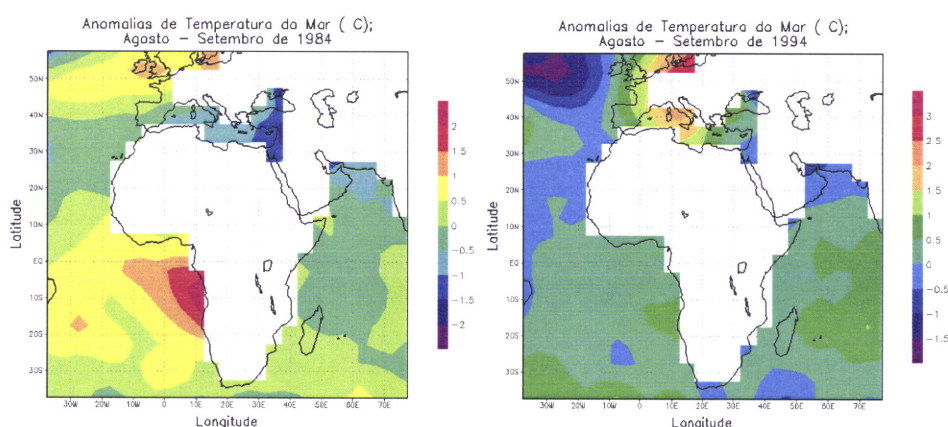


Figura 3.3.3.b.3: Anomalias da temperatura da superfície da água do mar, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Observando as figuras, nota-se ocorrência de valores positivos de anomalias de SST no Golfo da Guiné em ambos os anos de referência, durante o início da monção. Para os restantes períodos, persistem as anomalias positivas para o ano de 1984 (ano seco no sahel) e em 1994 (ano chuvoso) observa-se anomalias negativas. Esta situação confirma estudos de correlações

feitas entre as temperaturas da superfície das águas do mar do Golfo da Guiné e a ocorrência de precipitações no Sahel. Anomalias positivas de TSM no Golfo da Guiné equivale seca no Sahel e anomalias negativas da TSM do Golfo da Guiné corresponde a ano húmido no Sahel.

c) Humidade Relativa do Ar (%) aos 850hPa

A humidade é um termo que descreve o conteúdo do vapor de água existente no ar atmosférico.

A humidade relativa do ar é a razão entre a razão de mistura existente no ar, a uma dada temperatura e pressão, e a razão de mistura necessária para que ocorra a saturação, nas mesmas condições de temperatura e pressão. A humidade relativa é expressa em percentagem, assim 100% de humidade relativa do ar significa dizer que o ar está saturado, o que favorece a ocorrência de chuva. A humidade relativa do ar aos 850hPa representa a quantidade de humidade em toda a camada de ar aos 1500 metros de altitude.

Este parâmetro é importante para a determinação da instabilidade na atmosfera, auxiliando na previsão de tempestades.

As figuras 3.3.3.c.1, 3.3.3.c.2 e 3.3.3.c.3 são campos da humidade relativa do ar aos 850hPa para os anos de 1984 e 1994, no início, intensificação e fim da monção no Sahel, respectivamente.

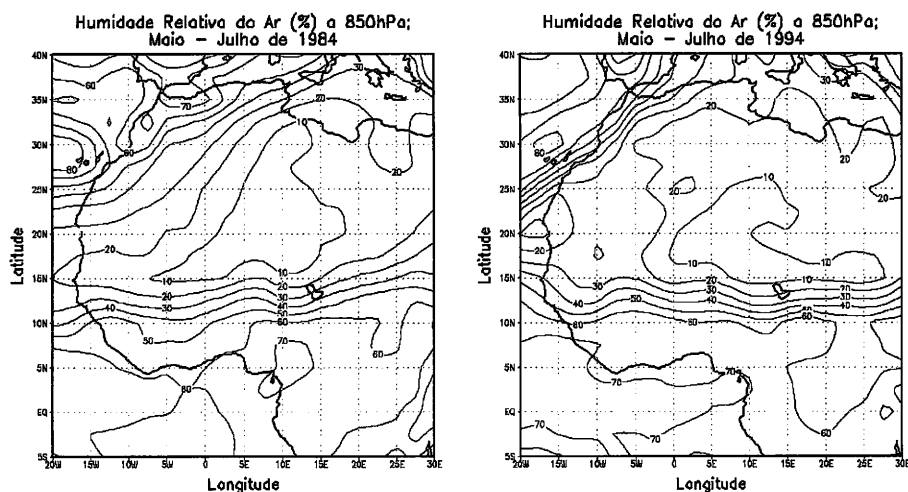


Figura 3.3.3.c.1: Humidade relativa do ar aos 850 hPa, no início da monção (15 de Maio - 15 de Julho) para 1984 e 1994, respectivamente.

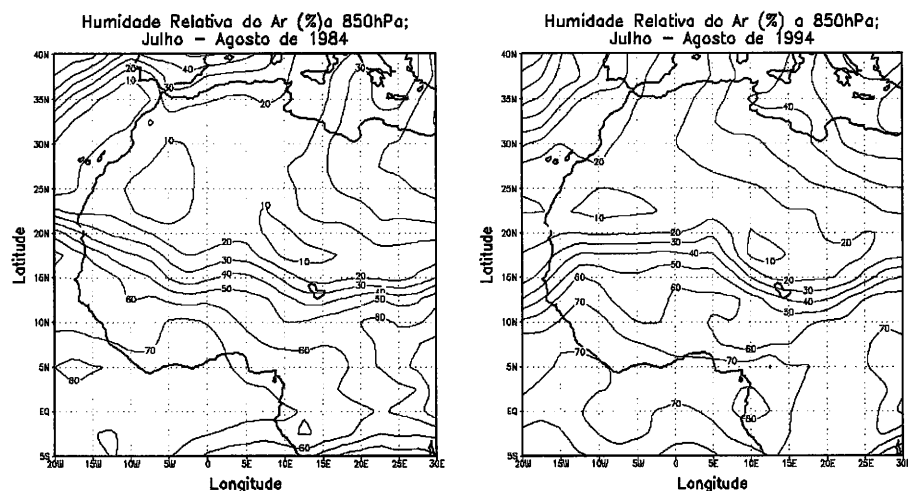


Figura 3.3.3.c.2: Humidade relativa do ar aos 850 hPa, na intensificação da monção (15 de Julho - 15 de Agosto) para 1984 e 1994, respectivamente.

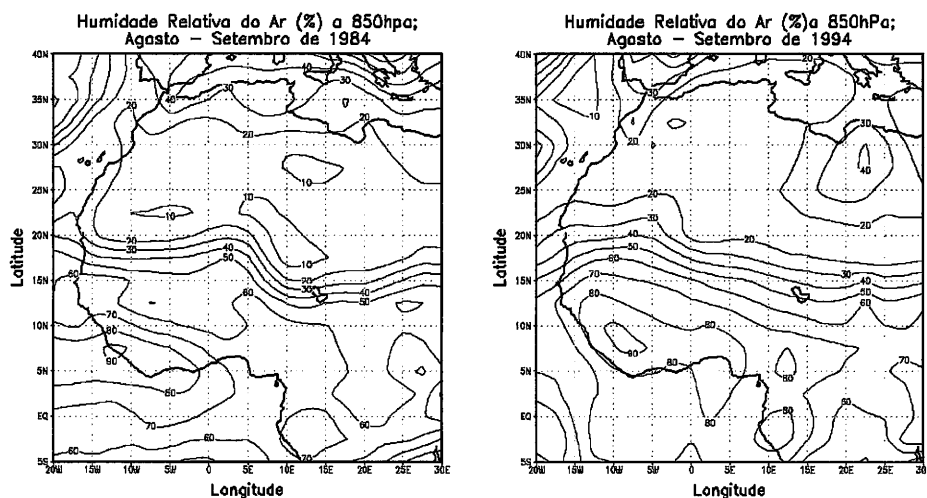


Figura 3.3.3.c: Humidade relativa do ar aos 850hPa, no fim da monção (15 de Agosto - 15 de Setembro) para 1984 e 1994, respectivamente.

Analisando as figuras dos campos da humidade, nota-se a predominância dos valores mais elevados em 1994 em relação a 1984, nomeadamente durante os períodos de intensificação e do fim da monção.

d) Conteúdo de Água Precipitável (Kg/m^2)

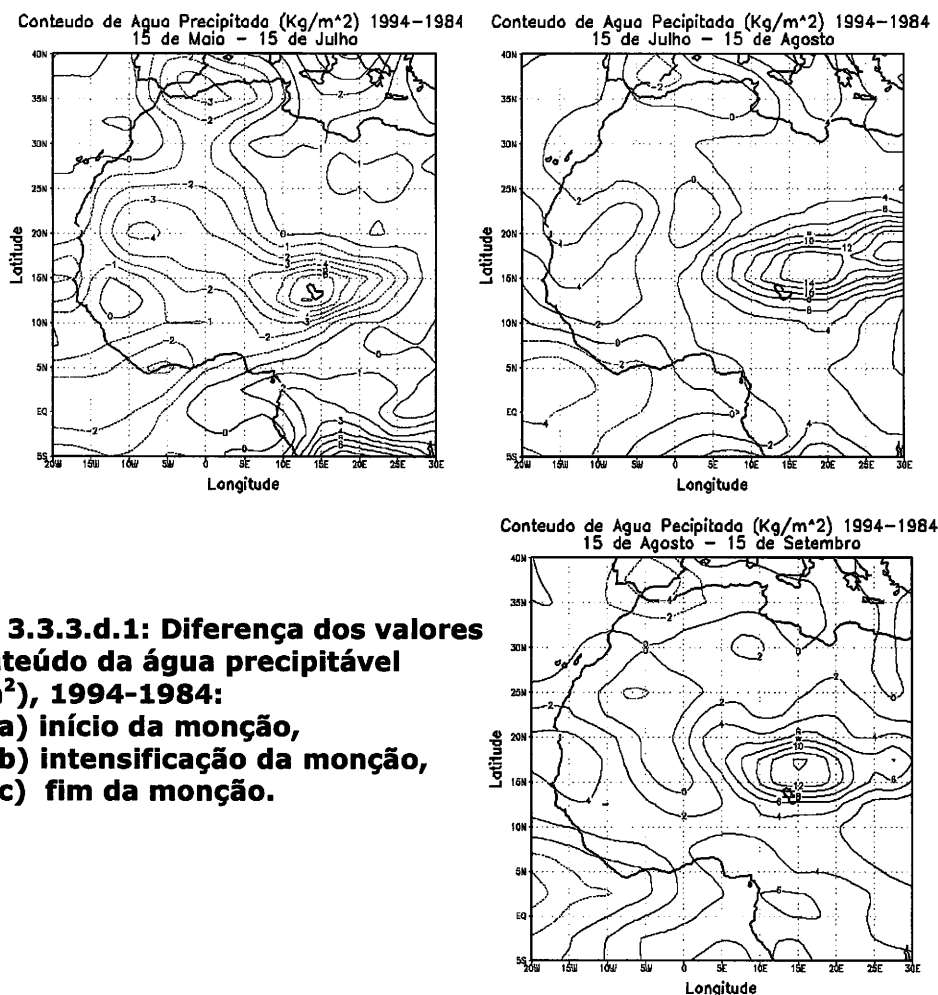


Figura 3.3.3.d.1: Diferença dos valores do conteúdo da água precipitável (Kg/m^2), 1994-1984:

- a) início da monção,**
- b) intensificação da monção,**
- c) fim da monção.**

A figura 3.3.3.d.1 representa o desvio dos valores da água precipitada (Kg/m^2) entre o ano chuvoso (1994) e o ano seco (1984), nos períodos do início, da intensificação e do fim da monção no Sahel.

No início da monção observa-se a predominância dos valores negativos, o que indica que o ano de 1984 observou-se neste período mais água precipitada em relação a 1994. Nos dois últimos períodos de evolução da monção, observa-se predominância dos valores positivos o que significa que o ano de 1994 registou mais água precipitável durante estes períodos.

3.4. Conclusões

De análise feita aos parâmetros meteorológicos: energéticos, dinâmicos e higrométricos, destacam-se o papel da energia estática húmida, a dinâmica dos fluxos de circulação zonal nos níveis médios (o Jacto de Leste Africano à 600hPa) e nos níveis altos (o Jacto de Leste Tropical à 200 hPa), a intensificação e/ou enfraquecimento dos Centros de Altas Pressões do Atlântico Norte e Sul; a temperatura de superfície da água do mar (SST) do Golfo da Guiné; como sendo principais factores que influenciam a dinâmica da monção oeste africana.

- **Balanço de Energia à Superfície:** apresenta padrões semelhantes em 1984 (ano seco) e em 1994 (ano chuvoso);
- **Fluxo total de radiação de pequeno comprimento de onda à superfície (>0),** no período da intensificação da monção este fluxo é menor em 1994 devido à maior nebulosidade. No início e final acontece o inverso;
- **Fluxo total de grande comprimento de onda à superfície (<0);** valores mais próximos de zero em 1994 (a superfície emite menos);
- **Fluxos meridionais da energia estática húmida (ESH):** a isolinha zero (0), que permite localizar a posição da ZCIT, tende a situar-se mais a norte em 1994;
- **Divergência da Energia Estática Húmida:** tende para uma maior convergência na baixa troposfera durante 1994, o que favoreceu o desenvolvimento dos sistemas convectivos;
- **Pressão ao nível médio do mar (SLP):** Anticiclone de Santa-Helena anormalmente fraco e Anticiclone dos Açores anormalmente intenso favorecem a ocorrência da seca no Sahel;
- **Ventos aos 925hPa e 850hPa:** os resultados apenas confirmam as diferentes intensidades da monção de sudoeste;
- **Vento aos 600hPa:** durante o ano seco de 1984 o Jacto Africano de Este (JAE) é mais intenso, mais zonal e está posicionado a sul da sua posição climatológica. No ano chuvoso de 1994, o JAE está situado mais a norte, é mais fraco e está essencialmente localizada sobre a Mauritânia;
- **Vento aos 200hPa:** o Jacto de Oeste Subtropical (JOST) é mais intenso no ano chuvoso de 1994 comparativamente ao ano seco de 1984;
- **Velocidade Vertical do Vento - Ómega:** subsidências anómalas em 1984;
- **SST:** anomalias positivas no Golfo da Guiné favorecem a ocorrência da seca no Sahel; e
- **Altura Geopotencial aos 850hPa:** maior em 1994 que em 1984.

CAPÍTULO IV: VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO SAZONAL NO SAHEL; MODELAÇÃO E PREVISÃO CLIMATOLÓGICA

Entre as principais manifestações de flutuações climáticas no Sahel, podemos citar as secas da última metade do Século XX. Vários trabalhos tentaram estabelecer relações entre as flutuações de precipitações e certos factores do clima nesta sub-região. Os principais parâmetros estudados são: O albedo do solo (Charney et al., 1977), a intensidade da radiação solar medida no solo (Courel et al., 1984), a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), os ventos em altitude, a nebulosidade, a pressão, o vapor de água (Lamb, 1978; Fontaine, 1991; Fontaine e Bigot, 1993; Janicot, 1989 e 1990; Mahé, 1993), a posição da Zona de Convergência Inter-Tropical – ZCIT (Citeau et al., 1988 e 1989. Mahé (1993) sublinhou que a complexidade do fenómeno é visível e nenhuma relação sistemática não foi estabelecida. Ele precisa de seguida que as correlações entre os valores médios dos diferentes parâmetros estudados não eram suficientes para explicar as variações de precipitações em África.

Neste capítulo ilustramos através de análise de séries pluviométricos, da região do Sahel, referentes ao período de 1960 à 2000, o regime pluviométrico e a variabilidade sazonal de precipitação no Sahel, e de seguida abordamos a modelação climática de precipitação no Sahel.

A primeira etapa consiste em testar estatisticamente as capacidades dos dados em reproduzir os mecanismos climáticos que eles caracterizam. Privilegiamos a análise de precipitações porque elas são assinatura a mais visível e a mais sensível do clima para os Homens, em particular na zona intertropical e sobretudo na região do Sahel.

A segunda etapa consiste na simulação e/ou avaliação do empenho do modelo de previsão sazonal de precipitação no Sahel.

4.1. Regime Pluviométrico na África Ocidental – SAHEL

Os estudos focalizados sobre a variabilidade da pluviometria na África Ocidental e a sua relação com a dinâmica do sistema terra-oceano-atmosfera estão bem documentados, com privilégio para relações entre a precipitação e temperatura de superfície dos oceanos (TSO). Esta relação dispensa demonstrações porque o assunto foi largamente estudado desde há 20 anos (Folland et al., 1986; Palmer, 1986; Ropelewski e Halpert, 1989; Janicot, 1992a, b;

Fontaine et al., 1998). Estes estudos fornecem abundantes e sólidos conhecimentos que permitem de realizar comparações e testes.

Estudo recente de SULTAN; 2002, ilustra os padrões de regimes pluviométricos na África Ocidental (figura 4.1.1) através de médias diárias de precipitações.

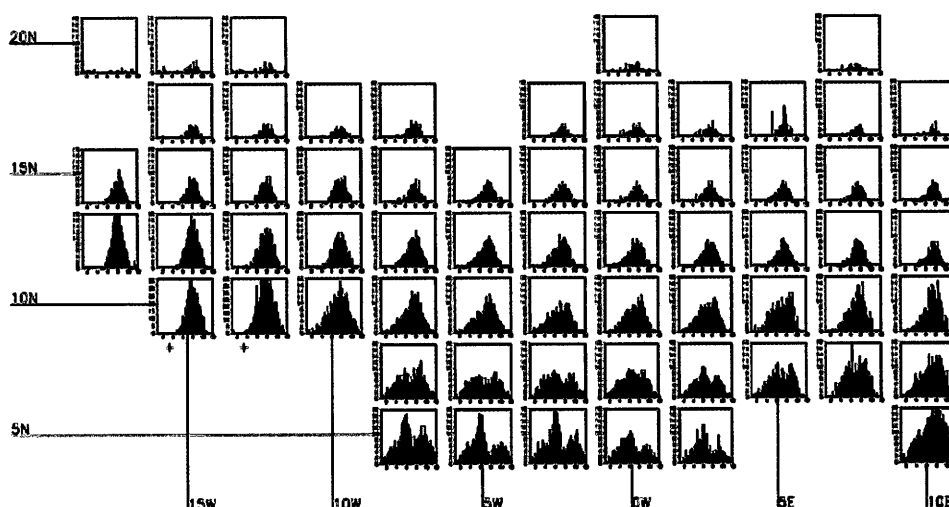


Figura 4.1.1: Média diária de precipitações (em mm), no período de 1968-1990 para cada ponto da grelha a partir do ficheiro de observação do IRD. Os dois diagramas marcados por (+) têm uma escala em ordenada diferente dos outros diagramas. (Fonte – SULTAN; 2002).

Na África Ocidental, o regime pluviométrico anual é imposto pela posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que delimita uma zona de ar húmido instável no encontro dos alísios dos dois hemisférios. O deslocamento em latitude da ZCIT em relação ao movimento aparente do sol determina a distribuição anual de precipitação pondo dois grandes regimes: o regime bimodal das latitudes Guineenses marcadas por duas épocas húmidas na primavera e no Outono, e o regime da monção que ritma nas latitudes Sudano-Sahelianas à alternância entre um Inverno seco e um verão chuvoso (Nicholson et al., 1998; Moron, 1994).

O carácter fortemente zonal da distribuição zonal dos dois regimes ilustrado na figura 4.1.1 traduz a importância de tomada em consideração regional da migração meridional da ZCIT para descrição e compreensão do ciclo sazonal de precipitação na África Ocidental.

Recente estudo levado a cabo pelo CIRAD e AGRHYMET (2005), intitulado: "as acções de luta e de pesquisa contra a insegurança alimentar no Sahel", conclui que as precipitações no Sahel se caracterizam por uma grande variabilidade inter-anual e inter-mensal. Vários factores podem entrar em jogo para explicar estas variabilidades, trata-se, entre outros, dos factores internos ligados à complexidade das interacções na atmosfera, dos factores de interacções com o oceano ligado à variabilidade das correntes oceânicas assim como do aquecimento periódico anormal da superfície do mar, etc.

O Sahel está inserido num vasto sistema climático mundial e não foge a regra da evolução do clima mundial a curto, médio e longo prazo. Não se pode fazer ilusões d'excepções sahelianas.

No século passado foram observados vários períodos de seca no Sahel:

- Uma fase de seca a volta de 1915;
- Uma fase húmida centrada nos decénios de 50 e 60;

- Uma segunda fase de seca que começou desde dos anos 70 e que continuou até final do Século XX.

Assim, comparando o período 1970-2000 com o período 1950-1967, assiste-se a uma baixa de isoietas de um grau de latitude em média, de Cabo-Verde a Tchad. Por além, disto não há modificações. Esta situação se ilustra para todas as isoietas (300mm, 600mm, 900mm).

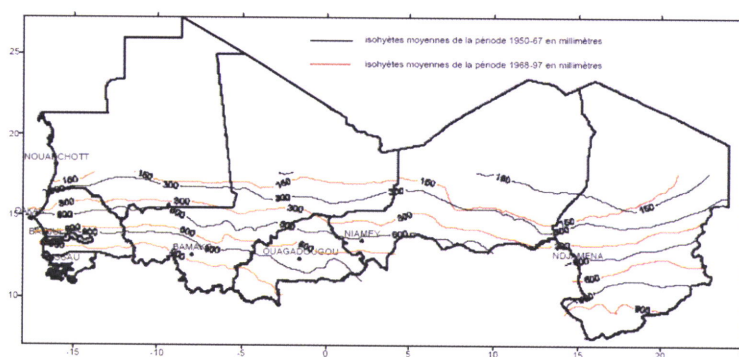


Figura 4.1.2: Deslocamento das isoietas entre os dois períodos antes e depois de 1968; (Fonte: CIRAD&AGRHYMET, 2005).

Toda a região, e não unicamente a zona Saheliana, foi atingida com este fenómeno de ruptura entre os anos 60 e 70. De uma maneira geral existe, por volta dos anos 1968-1972, uma ruptura nas séries dos cúmulos anuais (Figura 4.1.3). A média dos cúmulos anuais observados depois da ruptura é da ordem de 30% inferior em relação a média dos cúmulos anuais antes da ruptura. Ocorreu então manifestamente uma mudança do regime pluviométrico na África Ocidental em particular no Sahel depois dos anos 70.

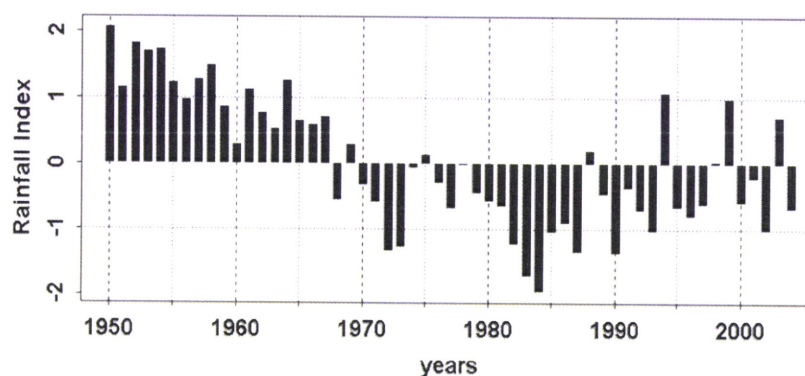


Figura 4.1.3: Índice de precipitação anual no Sahel (1950-2004); (Fonte: CIRAD&AGRHYMET, 2005)

As principais modificações registadas são:

- Deslocamento de isoietas para sul a mais de 100Km por localidades, com as consequências sobre as repartições agroecológicas entre as zonas agrícolas, pastorais e não pastorais;
- Diminuição mais importantes na parte Oeste do Sahel (Senegal e Mauritânia) em relação ao resto do Sahel;

- Diminuição de número de dias com precipitação, sobretudo no seio do coração da época chuvosa;
- Início da época chuvosa tornou-se mais variável enquanto que o fim da época chuvosa mantém-se estável entre estes dois períodos;
- Encurtamento da duração agrícola da época chuvosa;
- Aumento de frequência de secas.

Depois, houve uma estabilidade global, no entanto com as variabilidades importantes entre os anos. Assim, se comparamos o decénio de 1990-2000 com a normal 1971-2000, constatamos uma certa estabilidade nas alturas pluviométricas registadas. As diminuições foram paradoxalmente mais importantes nas zonas de savanas (Guiné-Bissau, sul do Mali, sul do Tchad) ao sul dos países tipicamente sahelianos. Esta estabilidade se encontra também nos números de dias de ocorrência de precipitação.

As condições pluviométricas são mais favoráveis com cúmulos médios do decénio perto da normal para a parte do Sahel Central enquanto que para o Sahel Ocidental o deficit persiste mesmo que seja menos importante.

Fora destas grandes variabilidades, existe uma grande variabilidade de precipitações de um ano para outro. Assim os totais de precipitações anuais, de 1982 e 1983 foram as mais deficitárias, enquanto que os anos 1994 e 1999 foram excedentários.

Antes de passarmos a secção de análise da série temporal de precipitação, convém realçar que os estudos feitos por Janicot e Fontaine (1993) mostram que a distribuição de precipitações na África Ocidental depende dos dois factores principais: intensidade (volet "dinâmica") e espessura (volet "potencial precipitável") do fluxo de monção.

Alguns trabalhos mostram ainda que certas secas estão associadas à um fluxo de monção menos espesso (em ligação com a posição da ZCIT mais ao sul), mas há outros tipos de secas em que a quantidade da água precipitável disponível é normal até mesmo excedentário, neste caso a convecção é mais fraca; o potencial da água não é explorada pela dinâmica da atmosfera; Tanaka e al, 1975, Lamb (1983), Janicot (1992a) e b).

4.2. Análises Estatísticas da Série Temporal de Precipitação

4.2.1. Tendência da Série

A determinação da tendência pode ser feita pelo modelo clássico de análise de série temporal (Moretin e Toloi, 1987) dado por:

$$Z_t = T_t + S_t + a_t \quad (4.2.1)$$

Onde Z_t representa a série temporal, T_t a tendência, S_t a componente cíclica, a_t a parte aleatória da série e t o número de observações, variando de 1 à 41 anos neste caso. Para a eliminação da componente cíclica foi utilizada a média móvel da 3 ordem. As oscilações de altas-frequências presentes nas séries temporais de precipitação no Sahel são decorrentes eventualmente das teleconexões com o fenómeno El-Niño e dos SST no Golfo da Guiné, por exemplo, que têm uma incidência na região. O modelo de tendência usado neste estudo é obtido através do comportamento linear da série de observações; assim, a equação (1) reduz-se à seguinte expressão:

$$Z_t = T_t + a_t \quad (4.2.2)$$

O Z_t é o valor da série temporal no tempo t , T_t é a tendência no período t e a_t é o erro aleatório associado ao período de tempo t .

As tendências temporal das séries foram determinadas através de um polinómio de primeiro grau, dada pela seguinte expressão:

$$T_t = \beta_0 + \beta_1 t \quad (4.2.3)$$

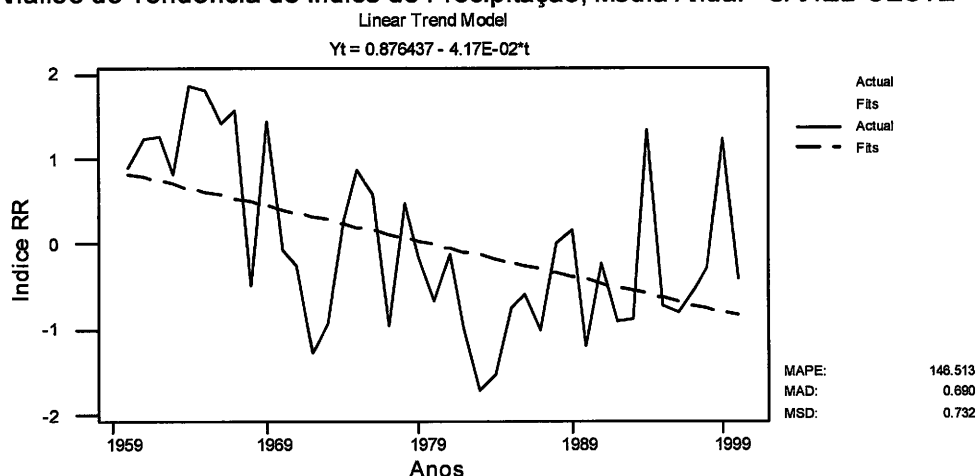
Os parâmetros, β_0 e β_1 , foram determinados através do método dos mínimos quadrados (Spiegel, 1977). O coeficiente β_1 indica a tendência da série temporal representada pela declive da recta de regressão. O significado estatístico das séries foi verificada mediante a aplicação do teste de hipótese para o coeficiente de regressão linear (β_1) dado por:

H_0 : $\beta_1=0$, não existe tendência;

H_0 : $\beta_1 \neq 0$, existe tendência com dado nível de significado.

A figura 4.2.1 apresenta os resultados de análise da tendência para o Sahel-Este e Sahel-Oeste, respectivamente. Na parte oeste do Sahel, a tendência de uma baixa de precipitação é mais acentuada em relação a região Este; apesar de flutuações interanuais que se observam em ambas zonas.

Análise de Tendência de Índice de Precipitação, Média Anual - SAHEL-OESTE



Análise de Tendência de Índice de Precipitação Média Anual - SAHEL-ESTE

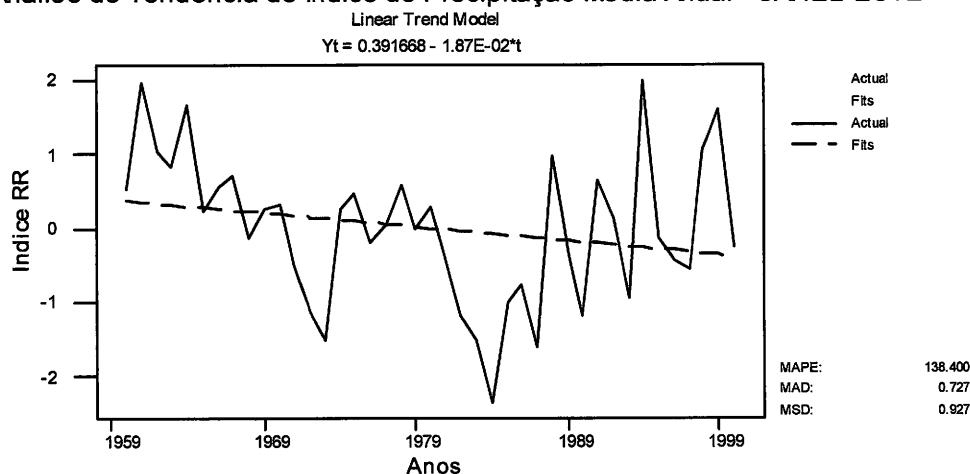


Figura 4.2.1: Análise de tendência de índice de precipitação média mensal, Maio a Outubro, para 1960-2000: Sahel-Oeste e Sahel-Este, respectivamente.

Em anexos I.A) e II.A) apresentam-se resultados de análise da tendência para Sahel-Este (exemplo do meridiano 15°E) e Sahel-Oeste (meridiano 15°W).

4.2.2. Índices Anual de Precipitação

Os índices de precipitação anual ilustram a variabilidade da precipitação anual em torno da média. A figura 4.2.2.1, apresenta índices de precipitação anual, 1960 a 2000, para região do Sahel-Este e Sahel-Oeste. percebe-se que a variabilidade inter-anual dos índices de precipitações obedece um padrão idêntico em termos de flutuações, e se apercebe da melhoria das condições pluviométricos nos últimos anos na zona leste em relação a zona oeste do Sahel, os anos 98, 99 e 2000 testemunham esta diferença.

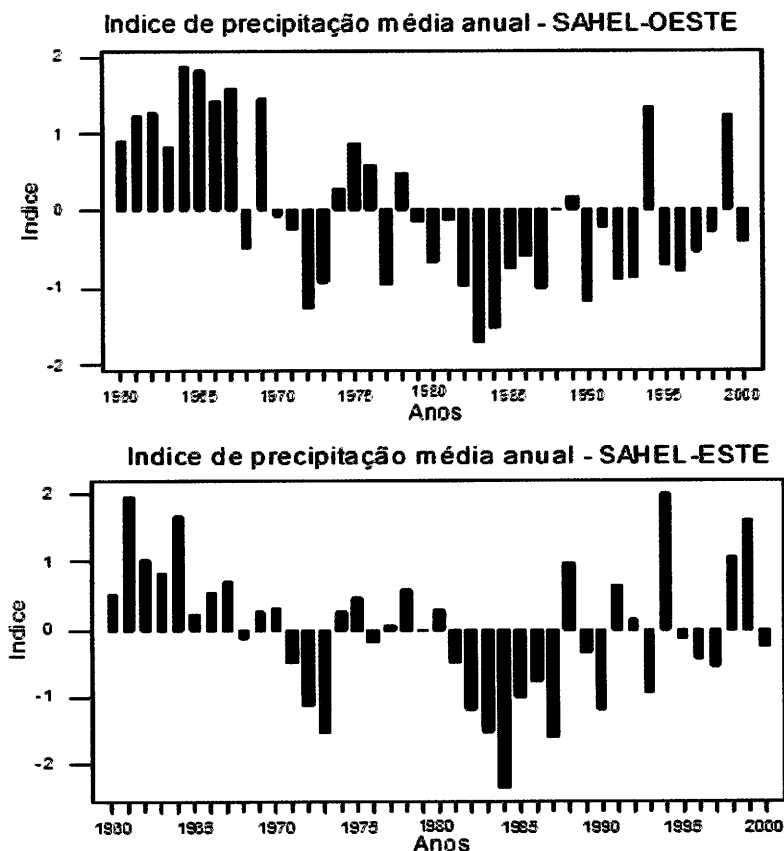


Figura 4.2.2.1: Índices de precipitação média anual: a) Sahel-Oeste e b) Sahel-Este

4.2.3. Precipitação Média Mensal

As figuras 4.2.3.1 e 4.2.4.2 ilustram o comportamento média mensal da pluviometria no domínio temporal (Maio a Outubro de 1960 - 2000) e a frequência de precipitação média anual, respectivamente, para a região do Sahel-Este.

Para a região do Sahel-Oeste, as figuras 4.2.3.3 e 4.2.3.4 apresentam o comportamento média mensal da pluviometria no domínio temporal (Maio à Outubro de 1960-2000) e a frequência de precipitação média anual.

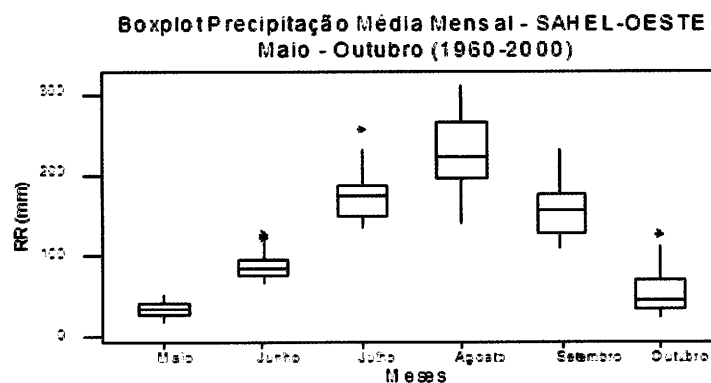


Figura 4.2.3.1: Boxplot da precipitação média mensal no Sahel-Oeste para 1960-2000.

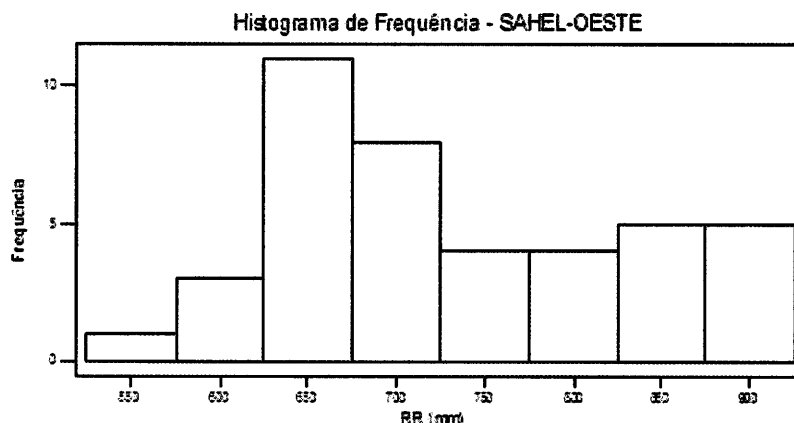


Figura 4.2.3.2: Frequência da precipitação anual no Sahel-Oeste para 1960-2000.

Da análise temporal, constata-se que os meses com maior variabilidade são os meses de Julho, Agosto e Setembro. Valores extremos foram detectados na série nos meses de Junho (+), Julho (+) e Outubro (+), (Figura 4.2.3.1).

No domínio da frequência, predomina-se a frequência de 650 mm e 700 mm anuais, (Figura 4.2.3.2).

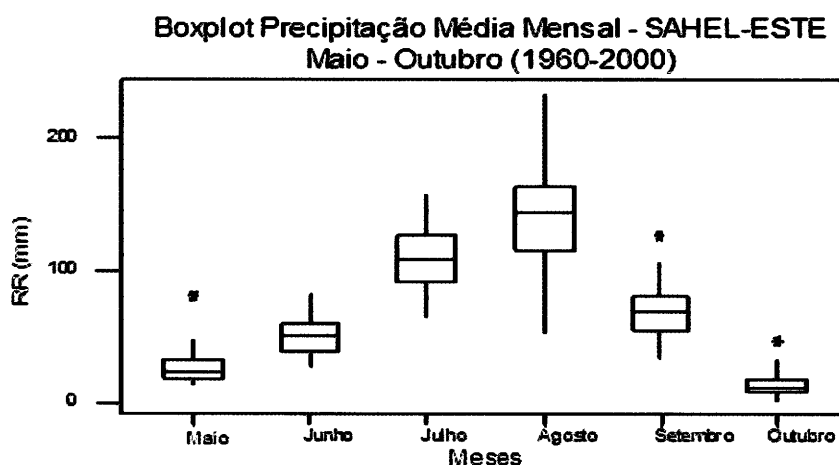


Figura 4.2.3.3: Boxplot da Precipitação Media Mensal no Sahel-Este para 1960-2000.

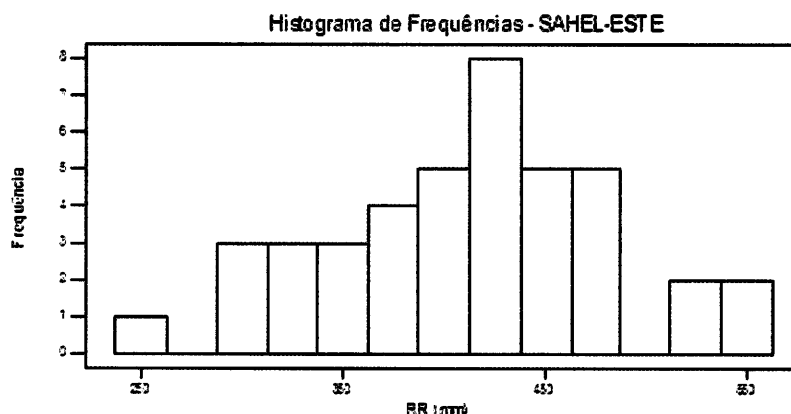


Figura 4.2.3.4: Frequência de Precipitação Anual no Sahel-Este para 1960-2000.

A análise temporal revela que os meses com maior variabilidade são os meses de Julho e Agosto; são detectados na série alguns valores extremos em Maio (+), Setembro (+) e Outubro (+), (Figura 4.2.3.1).

No domínio da frequência, nota-se a predominância da frequência de totais anuais da ordem de 400 mm; valores característicos da precipitação do Sahel (Figura 4.2.3.2).

4.2.4: Análise de Sazonalidade

As figuras 4.2.4.1 e 4.2.4.2 representam os resultados de análise sazonal e análise de componentes de precipitação para a região Oeste do Sahel.

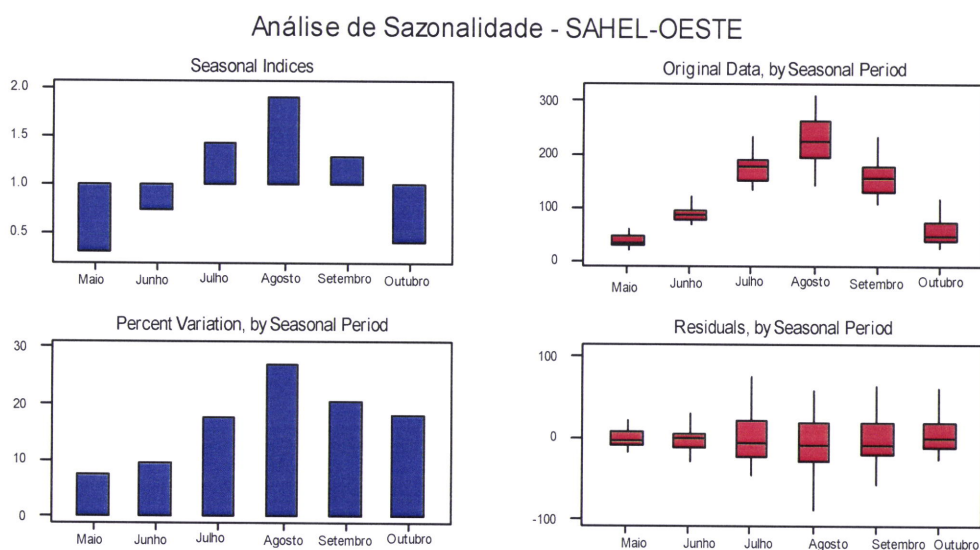


Figura 4.2.4.1: Análise de sazonalidade no Sahel-Oeste.

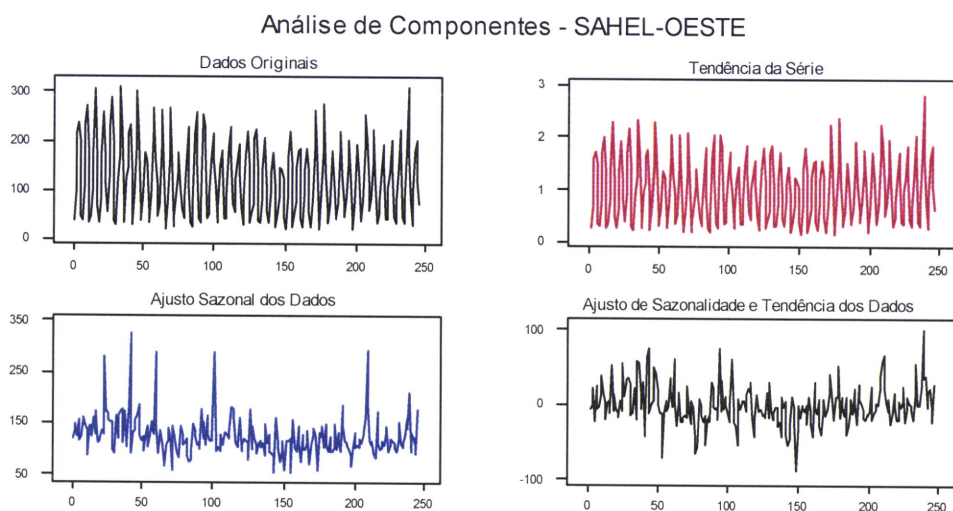


Figura 4.2.4.2 : Análise da tendência geral e da sazonalidade no Sahel-Oeste.

Na região Oeste do Sahel, a variação sazonal de precipitação é marcada com a contribuição significativa; isto é acima dos 10%, nos meses de Julho, Agosto, Setembro e Outubro; sendo o mês de Agosto o

predominante, com mais de 25% de contribuição. Os índices positivos foram detectados nos meses de Julho, Agosto e Setembro (Figura 4.2.4.1).

A tendência sazonal é quase nula ou inexistente. Remarca-se flutuações e no ajusto pode se detectar alguns picos, provavelmente ocasionados por valores extremos (Figura 4.2.4.2).

Análise de Sazonalidade - SAHEL-ESTE

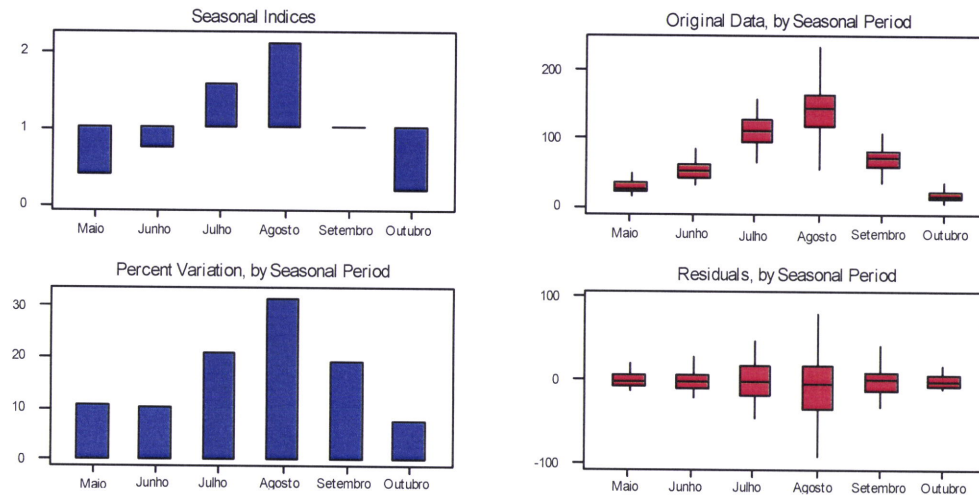


Figura 4.2.4.3: Análise de sazonalidade para Sahel-Este.

Análise de Componentes - SAHEL-ESTE

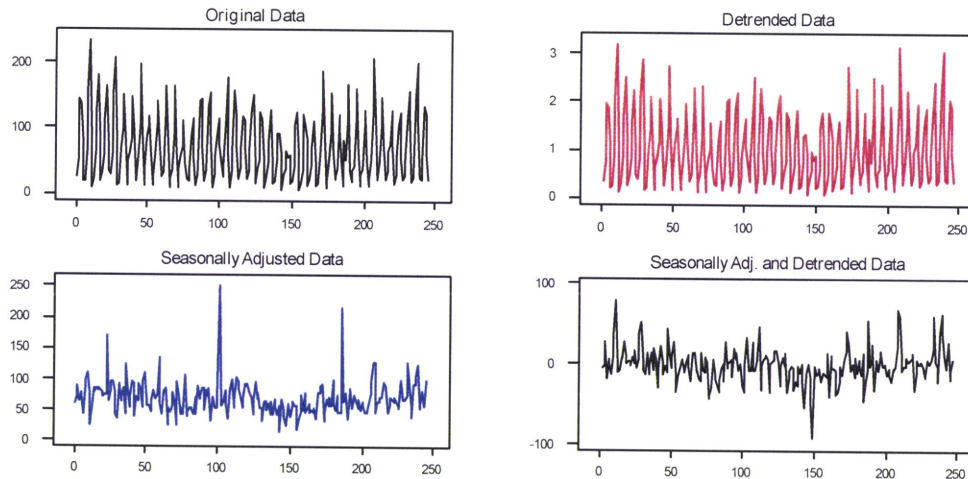


Figura 4.2.4.4: Análise da tendência geral e da sazonalidade no Sahel-Este.

Os meses de Julho, Agosto e Setembro apresentam a maior variação em termos percentuais no período sazonal de Maio à Outubro. Os meses de Julho e Agosto são meses com índices de precipitação positivos da série 1960-2000, (figura 4.2.4.3).

De análise de componentes, não se detecta tendência sazonal nos dados originais; mas, no entretanto, constata-se as flutuações intra-anuais (Figura 4.2.4.4).

4.2.5: Variação Anual de Precipitação

A figura 4.2.5.1 apresenta a variabilidade de precipitação anual para regiões de Sahel-Este e Sahel-Oeste, respectivamente.

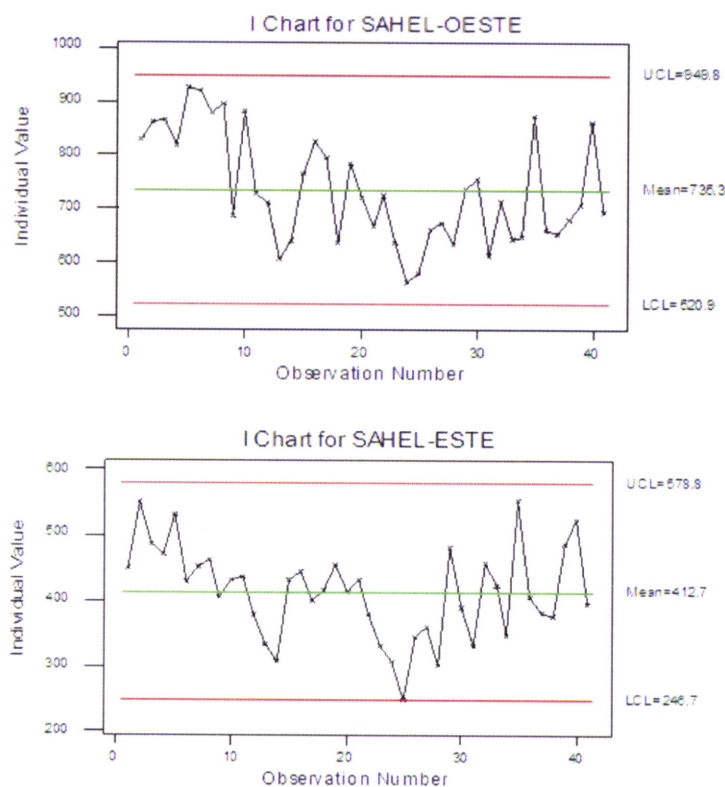


Figura 4.2.5.1: Variabilidade de Precipitação Anual para Sahel-Oeste e Sahel-Este, respectivamente.

Em ambas as regiões nota-se as flutuações inter-anuais em torno do valor médio climatológico. Os anos 70 e 80 são marcados por deficits pluviométricos acentuados; enquanto que os anos 90 parecem retomar a observação dos valores acima da média, embora apresenta também alguns anos abaixo da média.

4.2.6. Análise Espectral da Precipitação, pelo Método de Entropia Máxima

O método de máxima entropia (MME) baseia-se na procura de um filtro ou função $f'(\lambda)$ que convertam a curva espectral original $f(\lambda)$ num espectro de ruído branco $f''(\lambda)$, ou seja, com entropia máxima, ou seja ainda, em que variações em λ não causem variação em $f''(\lambda)$. Assim, esses filtros são funções que convulsionadas com a função da curva espectral original geram uma função onde se minimiza a variação entre a variável de entrada e a de saída (máxima entropia).

A figura 4.2.6.1 a) e b) representam os espectros de precipitação anual (1960-2000), para Sahel-Oeste (à 15W15.5N) e Sahel-Este (à 15E10.5N), respectivamente.

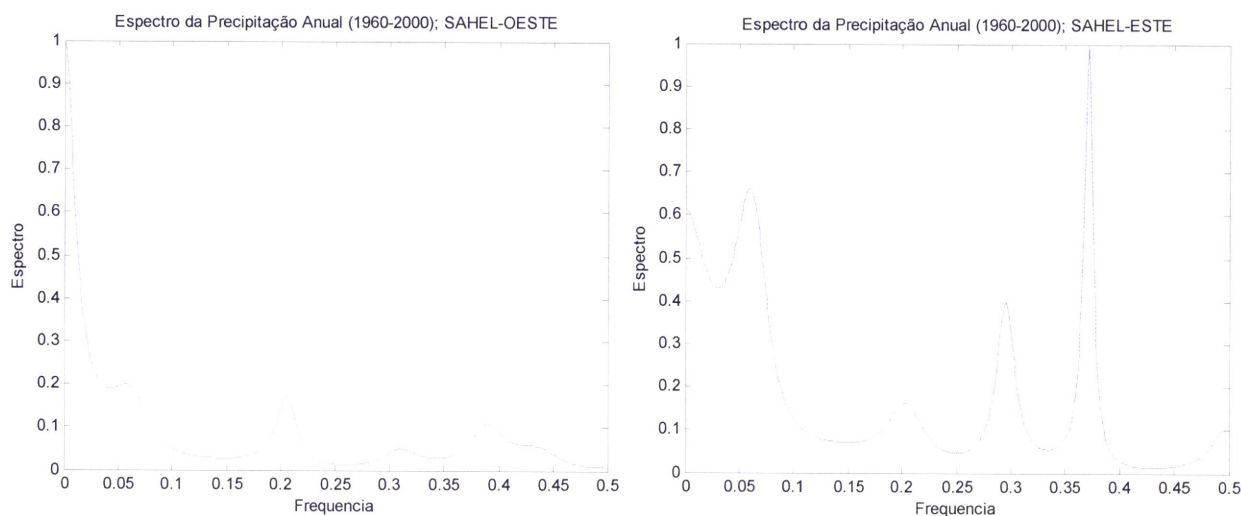


Figura 4.6.1: Espectro de frequência de precipitação anual (1960-2000) para: a) Sahel-Oeste e b) Sahel-Este.

Os espectros de frequência de precipitação anual foram obtidos a partir do algoritmo de Burg, elaborado pelo Prof. João dos Santos (U. Trás os Montes), para o cálculo de espectro pelo método de entropia máxima, com o MATLAB.

As curvas dos espectros de frequência da precipitação anual no Sahel-Oeste e no Sahel-Este, nas longitudes de 15°W e 15°E (ver Anexo III), apresentam distintas características de periodicidades internas. Embora não termos elementos suficientes para fazer inferências sobre eventuais relações entre as periodicidades e a dinâmica da monção oeste africana, mas presume-se que estas periodicidades de baixas frequências, equivalentes aos períodos longos tenham haver com as anomalias observadas na evolução normal do clima.

Tabela 4.6.1: Frequência e Período da precipitação anual, para Sahel-Oeste e Sahel-Este.mm

| Sahel-Oeste | | Sahel-Este | |
|-------------|----------------|------------|----------------|
| Frequência | Período (anos) | Frequência | Período (anos) |
| 0.002 | 500 | 0.371 | 3 |
| 0.059 | 17 | 0.060 | 17 |
| 0.205 | 5 | 0.002 | 500 |
| 0.390 | 3 | 0.295 | 3 |
| | | 0.204 | 5 |

4.3. Previsão Sazonal e Modelação Climatológica

A variabilidade inter-anual e inter-decenal da Monção Oeste Africana é bem documentada e tem motivado muitos esforços de pesquisas nos últimos anos. A passagem das consequências dramáticas de condições húmidas (nos anos 50 e 60) para as condições muito mais secas (dos anos 70 e 90) no Sahel, representa um dos sinais inter-decenais mais fortes observado no planeta durante o Século XX. Sobreposto a este sinal, as variações interanuais como consequência dos anos extremamente secos, agravam o impacto ambiental e sócio-económico do deficit no seu conjunto. Tal variabilidade levanta questões importantes para o desenvolvimento durável da região, nomeadamente, no que diz respeito a degradação das terras, da segurança alimentar e da gestão de água.

Neste contexto, é evidente o benefício de dispor de previsões sazonais à inter-anuais da monção e para minimizar os seus impactos sobre as populações e sobre os ecossistemas. Infelizmente, reconhece-se que as interacções entre diferentes componentes que governam em escalas variadas a variabilidade da monção oeste africana são relativamente desconhecidas. Estas lacunas resultam de falta de observações apropriados que permitiria melhor compreender as interacções complexas entre atmosfera, a biosfera e a hidrosfera que governam a dinâmica e a variabilidade da monção oeste africana.

4.3.1 – Previsão Sazonal de Precipitações no Sahel

A elaboração de previsão sazonal no Sahel é baseada no estado actual do clima global, assim como a sua evolução e os seus impactos sobre o clima regional. O processo de previsão sazonal consiste em prever a qualidade da época chuvosa futura, numa aproximação estatística entre os índices de precipitação no Sahel e as saídas dos modelos dinâmicos acoplados Oceano-Atmosfera. A previsão sazonal é considerada como uma das respostas a variabilidade interanual da precipitação da região.

O processo da Previsão Sazonal de Precipitação na África Ocidental (PRESAO) teve início em 1998 e foi implementado pelo consórcio ACMAD/AGRHMET/ABN. O objectivo é de produzir no início de cada época chuvosa, uma previsão de cumulos de precipitações para os meses de Julho, Agosto e Setembro, utilizando como prediceurs, as temperaturas de superfície da água dos oceanos (SST). A previsão é feita de forma qualitativa e dá as probabilidades em três categorias (excedentária, normal e deficitária). A figura 4.3.1.1 apresenta os resultados da Previsão Sazonal de Precipitação para África Ocidental – denominada PRESA-AO, para 2006. Esta é a nona edição destas previsões (PRESA-AO/09).

A previsão é feita a partir dos resultados dos modelos dinâmicos acoplados oceano-atmosfera, dos modelos não acoplados e a partir das sínteses dos modelos nacionais e internacionais fisicamente plausíveis e baseados numa aproximação estatística.

Os resultados da previsão são ordenados em três categorias:

- Categoria "superior à normal" corresponde a um terço das observações cujos cumulos pluviometricos foram superiores (33%).
- Categoria "inferior à normal" corresponde a um terço das observações cujos cumulos pluviometricos foram inferiores (33%).
- Categoria "quase normal" corresponde ao grupo dos anos restantes (33%).

A Normal pluviométrica é definida como a média dos 30 anos, neste caso no período 1961-1990.

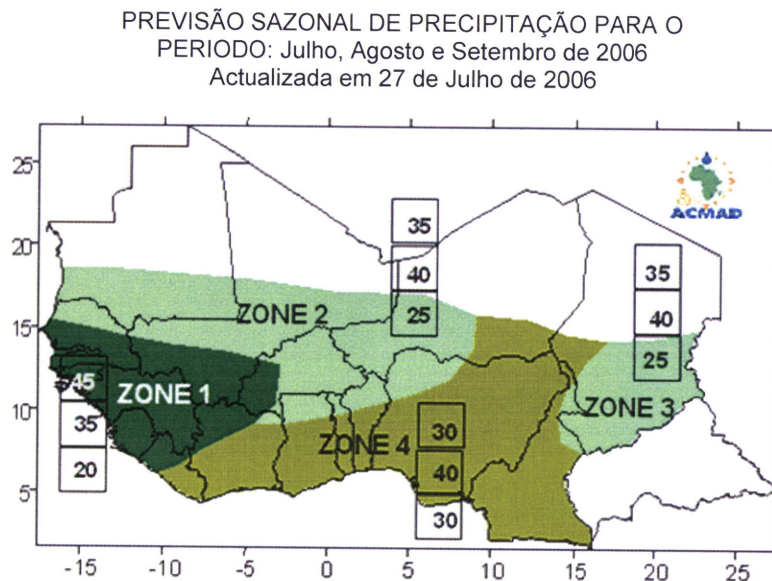


Figura 4.3.1.1: Previsão sazonal de precipitação para África Ocidental para Julho, Agosto e Setembro de 2006. (Fonte: <http://www.acmad.ne/>).

Descrição da figura:

- Zona 1:** (Metade do sul do Senegal, Gambia, Guiné-Bissau, Serra Leoa, metade norte da Libéria, noroeste da Costa do Marfim, oeste de Burkina Faso, sul do Mali): Cumulos de precipitação prevista excedentária com tendência à normal.
- Zona 2:** (Norte do Senegal, sul da Mauritânia, centro do Mali, centro e este de Burkina, centro, sul e oeste do Níger, noroeste da Nigéria, norte do Benin, do Togo e da Gana): Cumulo de precipitações prevista normal com a tendência húmida.
- Zona 3:** (Tchad e extremo noroeste do Camerão): Cumulo de precipitações prevista para normal com a tendência húmida.
- Zona 4:** (Sul da Libéria, sul e centro da Costa do Marfim, da Gana, do Togo e do Benin, sul, centro e este da Nigéria, Camerão, extremo oeste do Tchad, extremo este do Níger): Cumulo de precipitações prevista para normal.

4.3.2. Modelo de Previsão Climatológico – CPT (*Climate Predictability Tools*)

O CPT (*Climate Predictability Tool*) é um logiciel disponível sob Microsoft-Windows que faz: Previsão Climática Sazonal; Validação do Modelo e actualiza as previsões.

Sendo um programa basicamente destinado para estas aplicações, o CPT pode ser utilizado nos mais diversos arranjos gerais para executar as análises canónicas de correlações (CCA – *Canonical Correlation Analysis*) ou de regressão em componentes principais (PCR – *Principal Component Regression*).

O modelo foi elaborado pelo IRI (International Research Institute for Climate and Society) em 2003, por Ousmane Ndiaye e Simon J. Mason.

O Modelo está a ser utilizado de forma experimental na elaboração de previsões sazonais de precipitação pelo Centro ACMAD de Niamey – Níger.

O CPT foi concebido de forma a produzir as previsões sazonais do clima utilizando os modelos estatísticos de correlação (MOS – Model Output Statistic) para previsão climática a partir das saídas dos Modelos Globais de Circulação (GMC): ECHAM, NCEP, etc. Os dados de entrada são disponíveis na biblioteca dos bancos de dados do IRI (<http://iridl.ldeo.columbia.edu>).

Servimos deste pacote para testar o grau de relacionamento linear entre as várias meteorológicas (vento zonal em altitude 850 hPa, SST) e os Índices de precipitação no Sahel, no período de 1960 à 2000.

Utilizou-se o vento zonal U à 850 hPa (média de Março, Abril e Maio -MAM), a temperatura da superfície da água do mar (SST) do mês de Maio e os Índices de Precipitação no Sahel, dos meses de Julho, Agosto e Setembro (JAS).

Procedemos os dois tipos de análises: Análise Canónica de Correlação (CCA) e Regressão em Componentes Principais (PCR):

4.3.2.1. Análise Canónica de Correlação (CCA)

1. Vento Zonal à 850 hPa (MAM) e Índice de Precipitação (JAS)

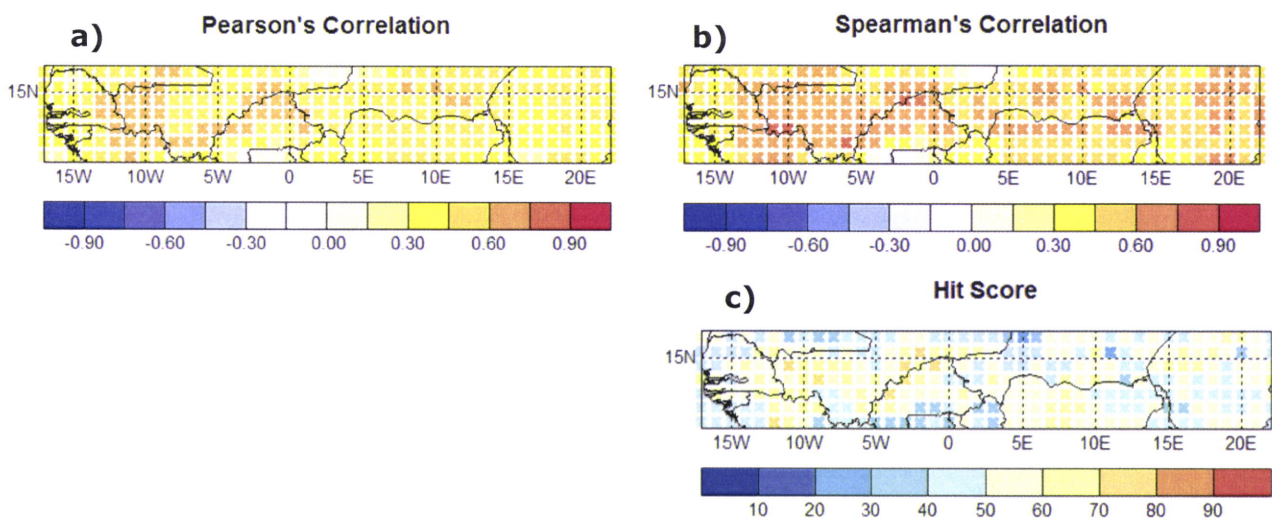


Figura 4.3.2.1.1: Validação do Modelo CPT - CCA: Predictor – U850 (Março, Abril e Maio) e Predictando – Índice de Precipitação no Sahel (Julho, Agosto e Setembro), 1961-2000.

2. SST (Maio) e Índice de Precipitação (JAS)

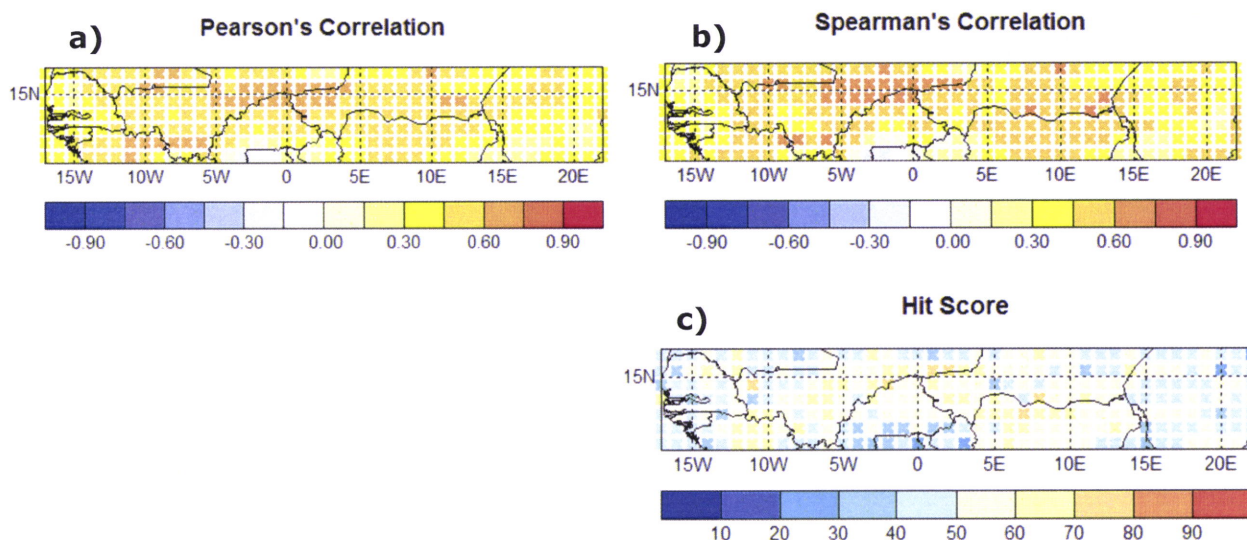


Figura 4.3.2.1.2: Validação do Modelo CPT - CCA: Predictor – SST (Maio) e Predictando – Índice de Precipitação no Sahel (Julho, Agosto e Setembro), 1961-2000.

4.3.2.2. Regressão em Componentes Principais

1. Vento Zonal à 850 hPa (MAM) e Índice de Precipitação (JAS)

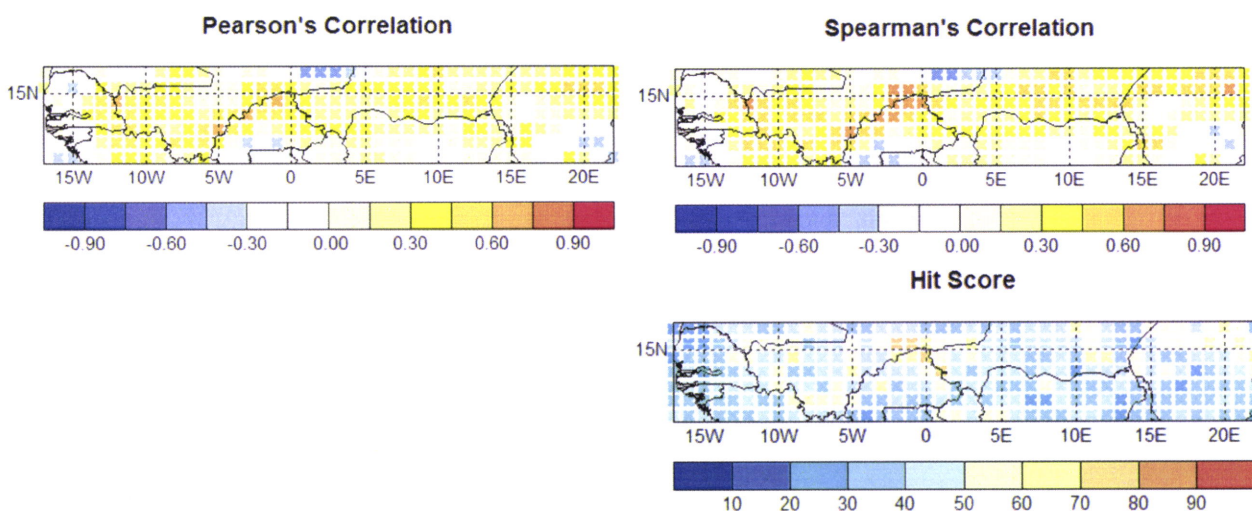


Figura 4.3.2.2.1: Validação do Modelo CPT - PCR: Predictor – U850 (Março, Abril e Maio) e Predictando – Índice de Precipitação no Sahel (Julho, Agosto e Setembro), 1961-2000.

2. SST (Maio) e Índice de Precipitação (JAS)

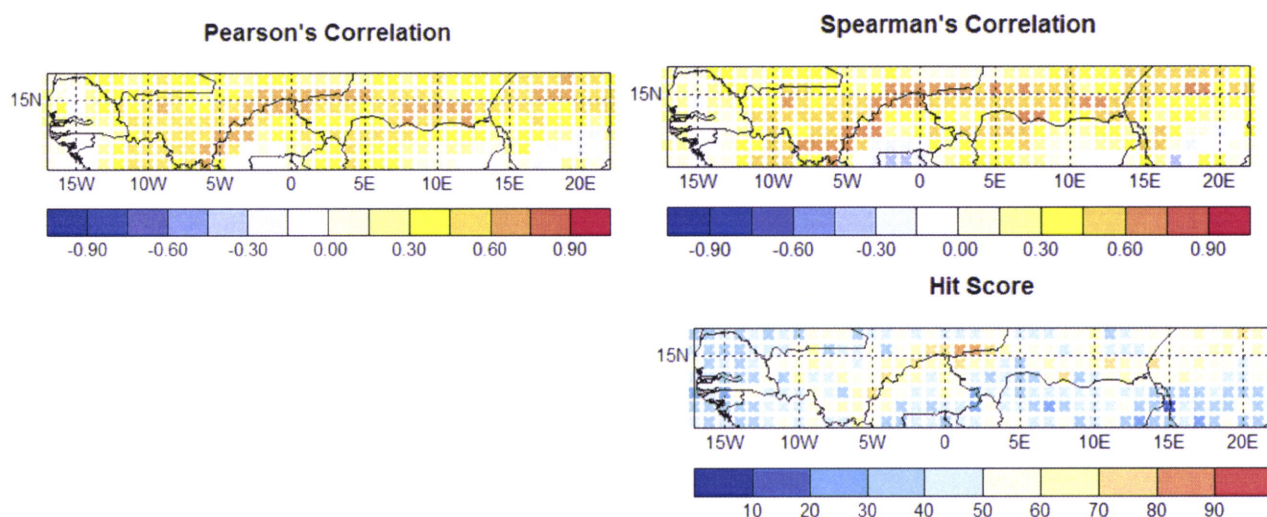


Figura 4.3.2.2.2: Validação do Modelo CPT - PCR: Predictor – SST (Maio) e Predictando – Índices de Precipitação no Sahel (Julho, Agosto e Setembro), 1961-2000.

Observando as figuras de Análise Canónica de Correlação (CCA) estabelecida entre o vento zonal à 850 hPa e os índices de precipitação no Sahel (figura 4.3.2.1.1) e entre SST e o Índice de precipitação no Sahel (figura 4.3.2.1.2), constata-se a predominância dos valores de correlação de Pearson (que reflecte o grau de relacionamento das variáveis) e os valores de correlação de Spearman (que reflecte o sentido da força de relacionamento das variáveis) entre 0.30 à 0.60, o que é uma relação significativa. O Hit Score que representa a performance do modelo, isto é, a percentagem dos períodos em que a categoria prevista pelo modelo corresponde a observada, observa-se em ambos os casos, valores entre 40% e pouco mais de 50%.

A validação do modelo feita pelo método de análise de correlação em componentes principais (PCR); entre o vento zonal à 850 hPa e os índices de precipitação (figura 4.3.2.2.1), apresentam valores significativos, localizados, de coeficiente de correlação do Pearson e Spearman, no interior do continente e fracos valores de correlações principalmente na costa. Com a SST e os índices de precipitação (figura 4.3.2.2.2), correlações significativas no interior entre 0.30 à 0.60 localmente, mas relativamente mais fraca na zona costeira. Quanto ao Hit Score, a performance do modelo é aceitável para ambos os casos.

4.4. Conclusões

A variabilidade de precipitação sazonal no Sahel depende de factores internos ligados a complexidade de interacções do sistema terra-oceano-atmosfera, o estado da superfície a escala local e regional, que governa a dinâmica da monção oeste africana.

O estudo permitiu pôr em evidência a elevada variabilidade e irregularidade da precipitação no Sahel.

Há uma diferença entre a parte Oeste do Sahel e a parte Este em termos de precipitação. De análise de tendência aplicada a estas duas regiões, observa-se uma tendência mais acentuada de baixa de precipitação no Sahel-Oeste em relação ao Sahel-Este. Os meses de Julho, Agosto e Setembro, representam mais de 80% de cúmulos de precipitação anual no Sahel. A precipitação sazonal no Sahel é caracterizada por uma forte variabilidade interanual.

Observa-se uma tendência negativa nos índices de precipitação mais acentuada na região Oeste do Sahel;

A análise de sazonalidade, permite identificar uma forte componente sazonal, com máximos de precipitação no verão, ainda que com elevada irregularidade.

A análise de espectro de frequência, permite concluir que a variabilidade de precipitação no Sahel é associada a ocorrência de baixas frequência e que explica em parte a periodicidade das secas no Sahel.

O modelo CPT já permite previsões sazonais com bons resultados e encoraja a sua aplicação na elaboração de previsões sazonais de precipitação no Sahel. É preciso ser testado outros predictores, nomeadamente as saídas de modelos de circulação atmosférica regionais, tais como o RAMS (Regional Atmospheric Modelling System).

CAPÍTULO V: IMPACTOS DA DINÂMICA DA MONÇÃO OESTE AFRICANA E DA VARIABILIDADE DE PRECIPITAÇÃO SAZONAL NO SAHEL SOBRE AS POPULAÇÕES E SOBRE OS ECOSISTEMAS

A identificação dos impactos da variabilidade climática sobre as populações e sobre os ecossistemas é um sujeito activamente estudado no mundo. Um tal exercício que tomaria em consideração as especificidades do Sahel, foi inscrito no programa de alguns projectos, como é o caso do projecto regional de "apoio ao reforço de capacidades de adaptação do Sahel às alterações climáticas", em curso de implementação no Centro Regional AGRHYMET, com apoio financeiro de Agência Canadiana de Desenvolvimento.

A diminuição da queda de precipitação nos últimos 30 anos foi registada em toda a África Ocidental, de Sahel à costa Guinéense. As consequências desta brusca diminuição dos recursos hídricos foram desastrosas, não somente para as populações, mais também para a economia e os ecossistemas. No Sahel, o gado diminuiu por dois, certas exportações de culturas desapareceram. Nas regiões mais húmidas do sul, durante verões de 1984 e 1998, os centrais hidroeléctricas foram parados, por motivo de fraca precipitação e falta de água. Estima-se que 1999, o crescimento económico de um país com Gana (com a taxa superior à 5%) estagnou, por causa de falta de água.

Neste capítulo, apresentamos na primeira secção uma abordagem sobre a evolução do crescimento demográfico no Sahel para dar melhor visão dos impactos que a variabilidade da monção, que é considerada como uma das assinaturas da variabilidade do clima no Sahel, sobre as populações e na secção 2 ilustramos um exemplo destes impactos sobre os ecossistemas – exemplo do lago Tchad.

5.1. IMPACTOS SOBRE AS POPULAÇÕES

O espaço Saheliano é um meio sujeito a riscos. A violência da crise actual é devido a conjugação de vários factores naturais e antropológicos: deficit pluviométrico sem precedente, sobrecarga das manadas, explosão demográfica, choque da modernidade que impõe o sedentarismo forçado dos nomados e uma urbanização selvagem (Charles TOUPET, 1995). Para minimizar esta crise torna-se necessário implementar uma política sustentável: i) gestão de água, ii) restauro da cobertura vegetal e iii) controlar a demografia.

A figura 5.1 mostra o impacto de falta de chuva na cultura do milho no Sahel.

A partir da metade do Século XX e desde 1960, a África Ocidental foi confrontado com um *choque* sem precedente no continente: o seu *crescimento demográfico* (Bangoura e tal., 2005).

Este crescimento demográfico rápido se acompanhou de dois fenómenos: a) emigrações que se propagam em todas as regiões; b) taxa de urbanização que aumenta mais rapidamente em relação a taxa demográfica (*dinâmica de transformação*).



Figura 5.1: Crescimento heterogéneo do Milho por falta da água
(Fonte: <http://www.amma-international.org>)

Nos trinta anos, o número e a estrutura de população sofreu profundas mutações. No período de 1960-1990 a taxa de crescimento demográfico atingiu 2,7% por ano em média regional. Resultado: A África Ocidental passou de 40 milhões de habitantes em 1930 à 85 milhões em 1960 para atingir 215 milhões em 1998 (Club du Sahel & OCDE, 1998). A população da região tem aumentado mais do que dobro em 30 anos. Actualmente atingiu 290 milhões de habitantes.

O crescimento da população mundial e da produção, associado a padrões não sustentáveis de consumo, tem aplicado uma pressão cada vez mais intensa sobre as condições que tem a nossa planeta de sustentar a vida. Esses processos interactivos afectam o uso da terra, a água, o ar, a energia e outros recursos (Agenda 21; Capítulo 5). As cidades em rápido crescimento, caso mal administradas, deparam-se com problemas ambientais gravíssimos. O aumento do número e da dimensão das cidades exige maior atenção para questões de Governo local e dos municípios. Os factores humanos são elementos fundamentais a considerar nesse intrincado conjunto de vínculos; eles devem ser adequadamente levados em consideração na formulação de políticas abrangentes para o desenvolvimento sustentável. Tais políticas devem atentar para os elos existentes entre as tendências e os factores demográficos, a utilização dos recursos, a difusão de tecnologias adequadas e o desenvolvimento.

As políticas de controlo demográfico também devem reconhecer o papel desempenhado pelos seres humanos sobre o meio ambiente e o desenvolvimento. É necessário acentuar a percepção dessa questão entre as pessoas em posição de tomar decisões em todos os níveis e oferecer, de um lado, melhores informações sobre as quais apoiar as políticas nacionais e internacionais e, de outro, uma estrutura conceitual para a interpretação dessas informações. Há necessidade de desenvolver estratégias para mitigar tanto o impacto adverso das actividades humanas sobre o meio ambiente como o impacto adverso das mudanças ambientais sobre as populações humanas. Prevê-se que em 2020 a população mundial já tenha ultrapassado os 8 bilhões de habitantes. Sessenta por cento da população mundial já vivem em áreas litorais, enquanto que 65% das cidades com populações de mais de 2,5 milhões de habitantes estão

localizadas ao longo dos litorais do mundo; várias delas já estão no actual nível do mar - ou abaixo do actual nível do mar.

Durante o período de 1980 à 1992 a população saheliana tem aumentado de 2,8% por ano (ver os quadros 5.1.1 e 5.1.2). Se o crescimento demográfico continua a seguir este ritmo, a população do Sahel vai duplicar daqui há 23 anos (Leisinger Klaus M. e Karin Schmitt).

Este forte crescimento da população é uma das consequências da baixa massiva da taxa de mortalidade desde 40 anos e da taxa estacionária ou em aumento parcial de natalidade.

Com efeito, as melhores das condições higiénicas e sanitárias, implementação dos programas de saúde de base, a protecção acrescida em matéria de vacinas – em particular para as crianças -, a terapia de rehidratação oral e um melhor aprovisionamento em medicamentos de base (antibióticos), fizeram diminuir rapidamente a mortalidade. O vasto programa de ajuda alimentar também tem contribuído nesta diminuição, porque assiste um grande número de pessoas de fome aquando de más colheitas.

No Sahel, como nos países do Terceiro Mundo, as taxas de natalidade dependem fortemente dos factores culturais e da sociedade assim como da forma de pensar e de agir. Eles modificam muito mais lentamente do que as taxas de mortalidade (Fribourg-en-Bresgau, 1966)

A perspectiva de forte crescimento demográfico permanente tem pesadas consequências económicas, sociais e ecológicas para os habitantes do Sahel.

Tabela 5.1.1: Crescimento Demográfico na Zona Saheliana

Crescimento demográfico na zona saheliana

| País | População em 1991 (em milhões) ^a | Crescimento demográfico 1991-92 ^a | Taxa de crescimento demográfico anual (em %, 1980-92) ^b |
|----------------------|--|---|--|
| Gambia | 1,0 | 31 000 | 3,8 |
| Níger | 8,2 | 258 000 | 3,3 |
| Senegal | 7,8 | 217 000 | 2,9 |
| Burkina-Faso | 9,5 | 271 000 | 2,7 |
| Mali | 9,0 | 255 000 | 2,6 |
| Mauritânia | 2,1 | 55 000 | 2,5 |
| Tchad | 6,0 | 151 000 | 2,4 |
| Zona do Sahel | 43,6 | 1021 000 | 2,8 |

Fontes: ^a Banco Mundial, *Social Indicator of Wealth 1994*, Washington 1994; ^b Banco Mundial, *World Table 1994*, Washington 1994

Tabela 5.1.2: Comparação de taxas de crescimento demográfico; 1980-1992.

Taxa de crescimento demográfico (em %, 1980-92)

| Todas as economias | Todas as economias em desenvolvimento | África Subsariana | Zonas do Sahel |
|--------------------|--|----------------------|-------------------|
| 1,7 | 2,1 | 3,2 | 2,8 |

Fonte: Banco Mundial; *World Development Report 1994*, Washington 1994

Tudo como nas outras regiões situadas ao sul do Saara, a demografia galopante empobrecimento rural tem provocado uma urbanização rápida (ver o quadro 5.1.3).

O aumento da demografia urbana se explica em primeira-mão por uma taxa de natalidade elevada em relação a das zonas rurais. A isso se acresce efeitos nefastos das secas dos 25 últimos anos sobre as terras cultiváveis e pela destabilização das sociedades rurais. Um bom número de pessoas, principalmente jovens, abandonaram as terras de origem para se instalar nas cidades, a miragem "luz da cidade" provocou a ilusão de melhores chances de sobrevivência e de um estandarte mais elevado (Klaus M. Leisinger e Karin Schmitt).

Bem que a maior parte dos emigrantes rurais não se realizam nos bairros pobres (os investimentos nos imobiliários, as ruas, alimentação e a água potável e o escoamento das águas usadas não correspondem a forte aumento demográfico urbano), as grandes cidades exercem sempre estas fascinantes onde nasce a esperança de melhores condições de vida, de uma melhor educação para as crianças e uma ascensão social facilitada. Para certos jovens, é também a ocasião de fugir das estruturas sociais muito rígidas das sociedades rurais tradicionais. Quando os valores adquiridos não são sujeitos a pressão da "grande família" que é a aldeia natal, eles perdem o seu significado. Começam então a procura de novos valores.

Tabela 5.1.3: Taxa de Urbanização na Zona Saheliana

| Taxa de urbanização na zona saheliana | | | |
|--|---|--|--------------------|
| País | População urbana em 1992 (percentagem da população Global) | Taxa de crescimento demográfico anual (em %, 1980-92) | |
| | | Pop. Total | Pop. Urbana |
| Burkina-Faso | 16,9 | 2,7 | 8,7 |
| Niger | 20,9 | 3,3 | 7,4 |
| Mauritânia | 49,6 | 2,5 | 7,2 |
| Tchad | 33,8 | 2,4 | 6,8 |
| Gambia | 23,8 | 3,8 | 6,1 |
| Mali | 25,1 | 2,6 | 5,2 |
| Senegal | 40,8 | 2,9 | 4,0 |
| Média para zona Sahel | 30,1 | 2,8 | 6,0 |

Fonte: Banco mundial, *Social Indicators of Wealth 1994*. Washington, 1994 e Banco Mundial, *World Tables 1994*, Washington, 1994.

Tabela 5.1.4: Estimativas da evolução da população nos países do Sahel*

| País | Área (km ²) | Pop. 1960 ² | Pop. 1970 ² | Pop. 1980 ² | Pop. 1990 ² | Pop. 2000 ² |
|--------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Burkina Faso | 274200 | 4472 | 5441 | 6820 | 8921 | 11905 |
| Cape Verde | 4030 | 196 | 267 | 289 | 349 | 436 |
| Guiné-Bissau | 36120 | 554 | 584 | 793 | 1016 | 1367 |
| Mali | 1240000 | 4422 | 5607 | 7044 | 9046 | 11904 |
| Mauritânia | 1030700 | 1001 | 1262 | 1609 | 2030 | 2645 |
| Níger | 1267000 | 3184 | 4141 | 5586 | 7650 | 10742 |
| Senegal | 196190 | 3187 | 4158 | 5538 | 7345 | 9393 |
| Chad | 1284000 | 3064 | 3697 | 4505 | 5822 | 7861 |

* Dados de população e superfície; Fonte: Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University; and Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), (2004). 2 Estimções (em milhares) - World population Prospects: The 2002 Revision.

Tabela 5.1.5: Tendências Demográficas nos Países do CILSS

| Classificação IDH | População Total (milhões) | | | Taxa de crescimento demográfico anual (%) | | População urbana (em % do total) ^a | | | População de menos 15 anos (em % do total) | | População de 65 anos e + (em % do total) | | Índice sintético de fecundação (por mulher) | |
|-------------------|---------------------------|------|-------------------|---|----------------------|---|------|-------------------|--|-------------------|--|-------------------|---|----------------------|
| | 1975 | 2003 | 2015 ^b | 1975-2003 | 2003-15 ^b | 1975 | 2003 | 2015 ^b | 2003 ^b | 2015 ^b | 2003 | 2015 ^b | 1970- 75 ^b | 2000-05 ^b |
| 152 Mauritânia | 1,4 | 2,9 | 4,0 | 2,5 | 2,7 | 20,3 | 61,7 | 73,9 | 43,1 | 41,7 | 2,7 | 3,4 | 6,5 | 5,8 |
| 157 Senegal | 5,3 | 11,1 | 14,5 | 2,7 | 2,2 | 34,2 | 49,6 | 57,9 | 43,4 | 38,8 | 2,5 | 3,4 | 7,0 | 5,0 |
| 172 Guiné-Bissau | 0,7 | 1,5 | 2,1 | 3,0 | 3,0 | 16,0 | 34,0 | 43,5 | 47,2 | 48,0 | 2,5 | 2,8 | 7,1 | 7,1 |
| 173 Tchad | 4,2 | 9,1 | 12,8 | 2,8 | 2,8 | 15,6 | 25,0 | 31,1 | 47,1 | 47,7 | 2,5 | 2,7 | 6,7 | 6,7 |
| 174 Mali | 6,2 | 12,7 | 18,1 | 2,6 | 2,9 | 16,2 | 32,3 | 40,9 | 48,3 | 46,7 | 2,2 | 2,4 | 7,6 | 6,9 |
| 175 Burkina-Faso | 5,9 | 12,4 | 17,7 | 2,6 | 2,9 | 6,3 | 17,8 | 23,2 | 47,7 | 45,7 | 2,3 | 2,6 | 7,8 | 6,7 |
| 177 Níger | 5,3 | 13,1 | 19,3 | 3,2 | 3,3 | 10,6 | 22,2 | 29,7 | 49,0 | 47,9 | 1,6 | 2,0 | 8,1 | 7,9 |

Notas

^a Estes dados repousam nas definições nacionais relativas as aldeias e as aglomerações, as comparações entre os países devem ser feitas com circunspeção.

^b Estes dados referem a metade do limite da projecção.

Fontes

Colunas 1-3, 13 e 14: ONU, 2005h

Colunas 4-5: cálculos efectuados com base nos dados das colunas 1-2.

Colunas 6-8: ONU, 2004

Colunas 9 e 10: cálculos efectuados com base nos dados relativos a população com menos 15 anos e população total que figura no ONU, 2005h.

Colunas 11 e 12: cálculos efectuados com base nos dados relativos a populações com mais de 65 anos da população total que figura no ONU, 2005h.

(Fonte: Relatório Mundial do Desenvolvimento Humano 2005).

Analisando os dados apresentados nas tabelas 5.1.1 (crescimento demográfico da zona do Sahel), 5.1.2 (Comparação de taxas de crescimento demográfico), 5.1.3 (Taxa de urbanização na zona saheliana), 5.1.4 (estimativas de evolução da população nos países do Sahel) e 5.1.5 (tendência demográficas nos países do CILSS), confirma a dimensão do problema e o impacto que tem a variabilidade da monção sobre as populações; a preocupação e o problema crescente que o Sahel terá que enfrentar nos próximos anos, nomeadamente a implementação de políticas coerentes de adaptação e mitigação a esses impactos e dos seus efeitos colaterais sobre a população: citamos o problema da segurança alimentar, gestão da água, adaptação às alterações do clima, o êxodo rural e sobretudo a emigração clandestina dos jovens para a Europa.

5.2. IMPACTOS SOBRE OS ECOSSISTEMAS

O fenómeno da degradação do ambiente tem tomado contornos preocupantes durante o último quarto do Século passado (1960-85). Constitui uma ameaça séria e preocupante para o futuro do Sahel: ruptura de equilíbrio entre o homem e o seu meio natural. Esta ruptura manifesta-se pela degradação das pastagens, diminuição de fertilidade dos solos, extinção das florestas; desaparecimento de cursos de água, etc. A estes fenómenos, acresce as recentes evoluções do clima no Sahel, nomeadamente os fenómenos da seca prolongadas, como as de 1972-73 e 1983-84, e recorrentes irregularidades da pluviometria.

O crescimento demográfico tem provocado uma enorme pressão sobre os recursos naturais. Esta pressão manifesta-se nomeadamente pela devastação das florestas por necessidades agrícolas e para diversos fins domésticos, etc.

Um exemplo do impacto do enfraquecimento da monção e consequente diminuição de precipitações sazonais sobre ecossistemas marinhos é o “desaparecimento do lago tchad” – (figura 5.2.1).

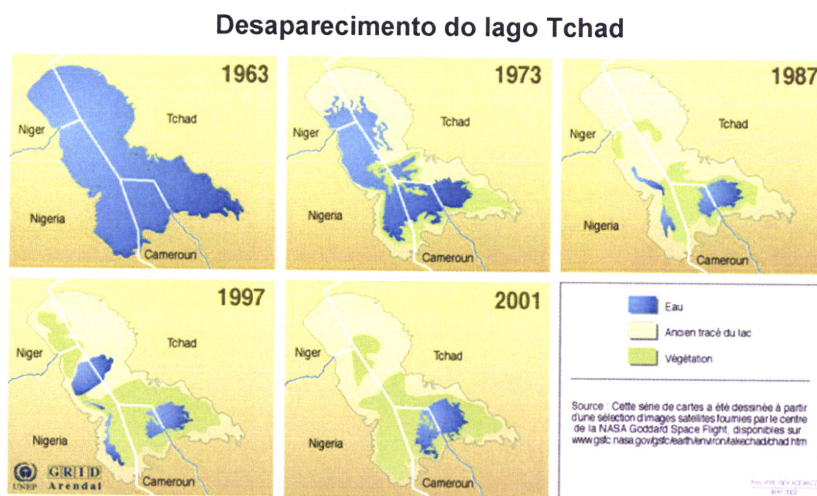


Figura 5.2.1: Desaparecimento do Lago Tchad;

(Fonte: NASA Goddard Space Flight, disponível em: www.gsfc.nasa.gov/earth/enviro/lakechadchad.htm).

O tamanho do lago Tchad aumentou e diminuiu à intervalos regulares. Mas a aridez crescente da zona do Sahel e as necessidades acrescidas em água doce para irrigação ocasionou uma redução perseverante do tamanho do lago Tchad.

Há quarenta anos, o lago passou de uma superfície de 25.000 à 5.000Km². A causa principal deste fenómeno é a diminuição da precipitação, acentuada pela grave secas dos anos oitenta. Segundo as previsões climáticas da NASA, ao ritmo actual, o lago poderá desaparecer daqui a vinte anos. Este cenário, considerado por muitos como “catastrófico”, é todavia um caso exemplar de uma situação cada vez mais preocupante que tem as suas repercussões sobre os ecossistemas no Sahel.

As alterações climáticas exacerbante a secagem de zonas de já áridas na África. Vorosmarty e Moore (1991) estudaram as consequências em prever as águas captadas pelos diques, das alterações de

afecção de terras e das alterações climáticas sobre o Zambeze e concluíram que estas podiam ser capitais. No caso da bacia de Zambeze, as alterações climáticas faziam diminuir a infiltração de pelo menos 40%, segundo a simulação.

A penúria crescente da água, o aumento da população, a degradação dos ecossistemas, o acesso a água doce e as exigências de consumo de recursos naturais em geral, no entanto em diminuição, faz aumentar os riscos de emergência dos conflitos bilaterais e multilaterais implicando vários países (Gleick, 1992).

As florestas do mundo inteiro foram e estão sendo ameaçadas pela degradação descontrolada e a transformação para outros tipos de uso da terra, sob a influência das crescentes necessidades humanas; da expansão agrícola; e da má utilização e gestão danosa para o ambiente, inclusive, por exemplo, falta de controlo adequado dos incêndios florestais, ausência de medidas de repressão à extracção ilegal, exploração comercial não-sustentável da madeira, criação de gado excessiva e ausência de regulamentação para o plantio de pastagens, efeitos danosos dos poluentes transportados pelo ar, incentivos económicos e outras medidas tomadas por outros sectores da economia. Os impactos da perda e degradação das florestas aparecem sob a forma de erosão do solo; perda da biodiversidade; dano aos habitats silvestres e degradação das áreas de bacias; deterioração da qualidade da vida; e redução das opções de desenvolvimento (Agenda 21, Capítulo 11).

A situação actual, no Sahel, exige a adopção de medidas urgentes e coerentes para a conservação e a manutenção dos recursos florestais. Criação de superfícies verdes em áreas adequadas, em todas as suas actividades componentes, é uma forma eficaz de aumentar a consciência e a participação do público no que diz respeito à protecção e na gestão dos recursos florestais. A iniciativa deve incluir a consideração de vários modelos de uso e ocupação dos solos e as necessidades locais, e deve enumerar e esclarecer os objectivos específicos dos diferentes tipos de actividades de reflorestação.

O Sahel sendo uma zona de ecossistemas frágeis: terras áridas e semi-áridas e desertos, é uma das regiões do mundo mais vulnerável as alterações do clima e o impacto da perturbação da monção sobre os ecossistemas é muito significativo.

A desertificação e a degradação do solo, resultante de vários factores, inclusive as actividades do Homem e alterações climáticas contribuem de forma significativa no crescimento da pobreza generalizada. A figura 6.2.2 ilustra a degradação do solo na África Ocidental. Na África Subsahariana, cerca de 67% de terras foram perdidas.

Uma das estratégias de combate a desertificação é a implementação das medidas de adaptação e preventivas para as terras ainda não atingidas pela degradação e pautar na recuperação das zonas degradadas.

As questões ambientais no Sahel são desafios maiores. Neste meio frágil a vegetação natural garante a produção alimentar para os homens e animais, trava a erosão, proteger os recursos hídricos, impede as

modificações climáticas e dá um espaço vital indispensável a fauna selvagem. Então, depois de vinte anos, a situação ecológica do Sahel degradou nitidamente.

Os sintomas são a diminuição das superfícies cultiváveis e das áreas florestais, de uma parte, a diminuição das espécies selvagens, de outra parte. Estima-se que a superfície floresta no Sahel diminuiu de 3% por ano em média, o que leva um desaparecimento total da cobertura florestal daqui a trinta anos se nenhuma medida for tomada.

As causas não são atribuídas exclusivamente aos decénios da seca que a região tem sido vítima. A grande seca dos anos 68-84 tem provocado um fenómeno de desertificação massiva, ¾ da região foram atingidos. Mas no fim dos anos 80 verificou-se uma retoma de vegetação no norte. É difícil actualmente diagnosticar uma modificação global e durável do clima, a região não tem conhecido mudanças decisivas desde aproximadamente 2500 anos; no entanto o Século XX foi o mais seco.

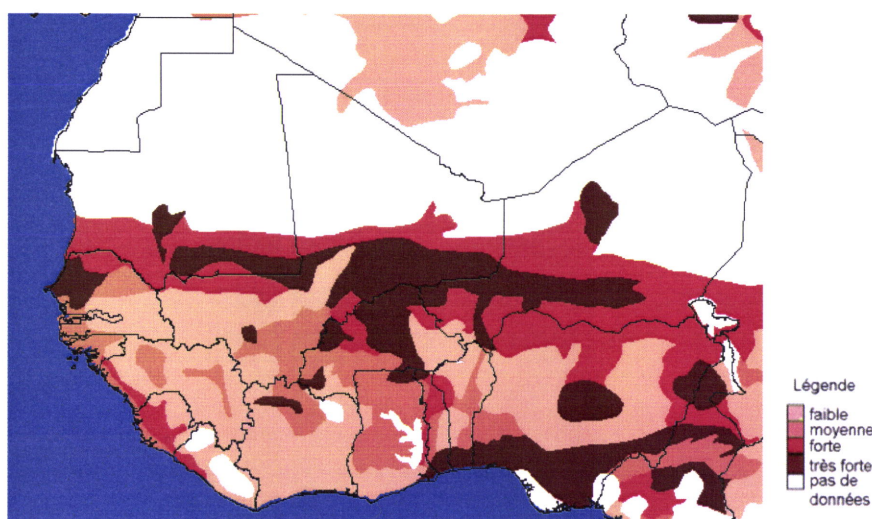


Figura 5.2.2: Degradação dos solos na África Ocidental

(Fonte: ISNAR – International Service for National Agriculture Research)

Tabela 5.2.1: Percentagem das terras degradadas em alguns países do Sahel

| País | Espaço inicial (milhares de ha) | Espaço restante (milhares de ha) | Perda (em %) |
|---------------------|------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| Gambia | 1130 | 124 | 89 |
| Senegal | 19620 | 3582 | 82 |
| Mauritânia | 38860 | 7380 | 81 |
| Burkina Faso | 27380 | 5476 | 80 |
| Mali | 75410 | 15836 | 79 |
| Níger | 56600 | 13018 | 77 |
| África subsahariana | 2079641 | 773774 | 63 |

A maior parte de mudanças nos ecossistemas e os seus serviços são graduais, o que lhes tornam detectáveis e previsíveis, pelo menos no princípio. No entanto, existe vários exemplos de mudanças não lineares e por vezes brutais dos ecossistemas. Uma mudança pode ser gradual até que uma pressão particular sobre o ecossistema atinge um dado limite por além do qual as transformações rápidas para um

novo estado intervém. Certas mudanças não lineares podem ser consideradas e ter impactos importantes no bem-estar humano.

A mudança do clima regional - a vegetação de uma região influencia o clima agindo sobre proporção da radiação solar que é reflectida, sobre a quantidade de água que as plantas libertam na atmosfera assim como a quantidade do vento e da erosão. Na região do Sahel, o coberto vegetal é estritamente ligado às precipitações. Quando a vegetação é presente, a água da chuva é rapidamente reciclada, o que aumenta geralmente as precipitações, o que, por sua vez, conduz a vegetação mais densa. A degradação das terras diminui a reciclagem de água e tem provavelmente contribuído a reduzir as precipitações no Sahel durante os 30 últimos anos.

Os ecossistemas estão aptos a fazer face às perturbações até um certo limite, isto é, são capazes de suportar e de retomar. As mudanças provocadas pelo Homem nos ecossistemas podem reduzir este limite e aumentar a probabilidade de aparecimento de mudanças bruscas no ecossistema, o que tem importantes consequências para o bem-estar.

As espécies de um ecossistema pertencem à diferentes grupos funcionais. No seio de cada grupo, as espécies podem contribuir de maneiras semelhantes aos processos, mas reagindo de formas diferentes às flutuações ambientais. Esta diversidade nas reacções permitem aos ecossistemas de se adaptarem as mudanças de ambientes e de preservar seus processos. Por conseguinte, a perda da biodiversidade a qual assistimos actualmente tem a tendência de reduzir estes limites dos ecossistemas.

Uma vez que ecossistema foi submetido uma mudança não linear, o seu retorno ao estado inicial é geralmente lento, custoso, e por vezes mesmo impossível.

Quatro conclusões maiores podem ser tiradas quanto aos impactos de variabilidade da monção oeste africana e das precipitações no Sahel sobre os ecossistemas:

- 1) No decorrer dos 50 últimos anos, o Homem tem modificado no Sahel os ecossistemas mais rapidamente e mais profundamente, que durante todo o período da história da humanidade, e isto foi em grande parte para satisfazer necessidades crescentes em matéria de segurança alimentar, da água e da energia. Isto conduz a perda substancial e irreversível dos ecossistemas;
- 2) As perturbações da monção oeste africana e a consequente variabilidade de precipitação sazonal no Sahel provocaram mudanças ocasionais dos ecossistemas e tem contribuído na degradação dos solos e no aumento do processo de desertificação no Sahel;
- 3) Se estas perturbações da monção oeste africana persistirem, conjugado com o ritmo e a tendência de baixa de precipitação no Sahel, durante os próximos 50 anos, isto pode constituir um dos obstáculos para atingir os objectivos do Milénio para o Desenvolvimento nos países do Sahel; e

4) O processo de degradação dos ecossistemas constitui um desafio maior para o Sahel. Segundo os cenários de alterações climáticas previsíveis, este desafio pode ser parcialmente minimizado no caso de serem tomadas as medidas de adaptação e mitigação aos efeitos das alterações do clima o que implica mudanças significativas bem como ao nível das políticas institucionais que ao nível das praticas correntes.

5.3.- Conclusões

Os impactos da variabilidade e alterações na Monção Oeste Africana (MOA) são muito significativos tendo em conta: a pobreza generalizada das populações, a carência dos recursos, a forte dependência das actividades primárias, a degradação dos solos e a progressiva desertificação, incapacidade ou lentidão da recuperação dos ecossistemas de secas anteriores, crescimento demográfico acentuado e a urbanização descontrolada.

CAPÍTULO VI: CONCLUSÕES GERAIS, SUGESTÕES E PERSPECTIVAS

Ao termo deste trabalho foram obtidos diversos resultados, alguns deles esperados desde início, outros não. Análise desses resultados é o objecto deste capítulo.

Na primeira secção apresentamos conclusões gerais dos resultados obtidos e na segunda secção as sugestões e orientação para trabalhos futuros.

6.1: Conclusões gerais

O estudo diagnóstico sobre a dinâmica da monção oeste africana permite confirmar a complexidade dos mecanismos que regem a dinâmica da monção oeste africana. Os resultados apresentados mostram os efeitos dos parâmetros meteorológicos sobre a monção oeste africana, nomeadamente as dependência do regime de precipitação do Sahel às temperaturas da superfície da água do mar (TSM) do Golfo da Guiné e põe em evidência o papel fundamental da energia estática húmida e os campos dos ventos em altitude. Também foi possível mostrar a tendência da precipitação na região Oeste e Este do Sahel e persistência dos déficits pluviométricos na parte Oeste do Sahel.

Este diagnóstico está longe de explicar as causas prováveis do enfraquecimento da dinâmica da monção oeste africana, mas pelo contrário constitui uma base e que se reconhece as suas limitações.

De análise feita a diversos parâmetros meteorológicos para compreender a dinâmica da monção oeste africana e a variabilidade da precipitação sazonal no Sahel, impactos sobre as populações e sobre os ecossistemas, pode se concluir que o enfraquecimento da monção oeste africana esta ligado à vários factores:

- Circulação ciclónica persistente nos níveis baixos associados a Jacto de Leste Africano forte aos 600hPa, que se desloca de Leste para Oeste perpendicularmente ao sinal sazonal do deslocamento para Norte da banda pluviosa; forte JAE na média troposfera (600 hPa) e forte JOST na alta troposfera (200 hPa).
- Intensificação do Anticiclone dos Açores e o deslocamento do Anticiclone de Santa-Helena para Sul;
- Anomalias positivas de temperaturas de superfícies da água do mar (TSM) do Golfo da Guiné.

O efeito do deserto do Sahara tem igualmente um papel importante no deslocamento da monção para o interior do continente através dos mecanismos de advecção de temperatura e humidade e igualmente o efeito radiativo dos aerossóis.

As análises comparativas feitas aos parâmetros atmosféricos importantes, tais como a pressão, o vento, a temperatura e a precipitação, põe em evidência as variações naturais recorrentes do clima chamadas de oscilações que, quando elas se produzem, modificam a configuração dos fenómenos extremos.

A variabilidade de precipitação sazonal no Sahel é um efeito conjugado de vários factores. Trata-se entre outros, dos factores internos ligados a complexidade de interações do sistema terra-oceano-atmosfera, o estado da superfície a escala local e regional, que governam a dinâmica da monção oeste africana. Reconhece-se o papel dos efeitos locais que caracteriza o clima Saheliano, mas deve-se afirmar que "não há excepções sahelianas". O Sahel encontra-se inserido num vasto sistema climático mundial sujeito às evoluções contínuas.

Nos últimos anos verificou-se uma melhoria da situação pluviométrica no Sahel, mas na parte Oeste persiste o efeito dos deficits pluviométricos e a tendência a baixa.

O ritmo actual da degradação dos ecossistemas no Sahel (degradação dos solos e desaparecimentos de lagos, etc.) conjugado com o crescimento demográfico galopante e os seus efeitos colaterais (urbanização, migração, etc.), é uma ameaça para o Sahel na concretização dos objectivos do Millénio.

Os impactos da dinâmica da monção oeste africa sobre as populações são mais do que evidente, pois o Sahel é uma das regiões do mundo mais vulnerável as alterações climáticas. Os principais factores da sua vulnerabilidade são:

- Uma pobreza generalizada;
- Secas cíclicas que fragilizaram os ecossistemas e os recursos naturais;
- Grande dependência da população activa (60% à 80%) de agricultura muito sensível aos caprichos climáticos;
- Um forte aumento de população (taxa de crescimento anual, aproximadamente de 3%), induzindo forte pressões sobre o ambiente;
- Desflorestação ligado as necessidades energéticas das populações.

As interações entre diferentes componentes que governam em escalas variadas a variabilidade da monção oeste africana são complexas e relativamente ainda desconhecidas. Para progredir na compreensão da variabilidade da monção oeste africana é necessário realizar estudos multidisciplinares fundamentadas em observações sistemáticas.

A variabilidade natural do clima, incluindo as associadas aos episódios do El Niño, provocam fenómenos hidrológicos extremos no Sahel, nomeadamente, as secas. As mudanças climáticas de origem antropogénico deverá intensificar o ciclo hidrológico e aumentar assim as frequências e a gravidade deste fenómeno. A incidência da diminuição dos recursos em água será particularmente marcada no Sahel, região com riscos elevados da seca e da penúria da água, problema exacerbado pelo aumento constante da densidade da população.

O Homem não pode travar as perturbações (extremos) do tempo e do clima, em geral, e da monção oeste africana, em particular; mas pode-se prever as variabilidades e minimizar os seus efeitos.

Para mitigação e adaptação das populações aos impactos da dinâmica da monção oeste africana e da variabilidade de precipitação sazonal é preciso pautar no aperfeiçoamento dos modelos climáticos de previsões sazonais para poderem modelar correctamente a variabilidade sazonal de precipitação no Sahel, de forma a contribuir na protecção e gestão racional dos ecossistemas e do ambiente integrado.

6.2: Sugestões e perspectivas para trabalhos futuros

Dentre as possibilidades de continuação deste trabalho de análise diagnóstico iniciado, destaca-se inicialmente continuação deste exercício incluindo análise de outros parâmetros, tais como: o transporte do vapor de água, dos aerossóis do deserto, etc. e também aprofundar estudo de modelação climática (previsão sazonal) utilizando saída dos modelos de circulação geral e modelos regionais. Existem bons motivos para isto:

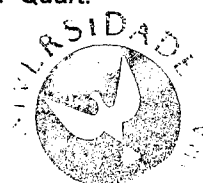
- É reconhecido que a tomada em consideração da influência dos aerossóis nos modelos de circulação geral da atmosfera e climáticos poderia melhorar a sensibilidade dos modelos na modelação da variabilidade do regime pluviométrico na África tropical, em geral, e no Sahel, em particular.
- Um dos objectivos do Programa AMMA é contribuir na melhoria das previsões meteorológicas e climatológicas de forma a minimizar os impactos da variabilidade da monção oeste africana sobre as populações e sobre os ecossistemas e proporcionar aos decisores, a todos os níveis, de informações que podem ser integrados na elaboração de estratégias e dos cenários plausíveis de alterações climáticas, na concepção e na implementação das políticas de mitigação e de adaptação aos efeitos das alterações do clima.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Abdou Ali, 2004** : Modélisation de l'invariance d'échelle des champs de pluie sahéliens ; Application aux algorithmes d'estimation et aux études de variabilité climatique ; *Thèse pour l'obtention du grade de Docteur de l'INPG*; Institut National Polytechnique de Grenoble ; 129 p.
- **Abdou Ali, A. Amani et Thierry Lebel, 2004** : Estimation des pluies au Sahel : utilisation d'un model d'erreur pour évaluer réseaux sol et produits satellitaires. *Rév. Sécheresse*, 15(3), 1-8.
- **Agenda 21, Rio-1992**: Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano, Capítulos III, V, XI, XII e XVIII.
- **Banco Mundial, 1994**: - Social Indicator of Wealth; World table and World Development Report; Washington.
- **Bangoura, D., Minard S., et Perret C., 2005** : Recensement des études rétrospectives et prospectives de l'Afrique de l'Ouest. *Rapport de Synthèse, Document de travail préparé pour le 30^{ème} anniversaire de la CEDEAO*, 64 p.
- **Bejamin Sultan, 2002**: Étude de mise en place de la mousson en Afrique de l'Ouest et de la variabilité inter-saisonnière de la convection. Applications à la sensibilité des rendements agricoles. *Thèse Doctorat, Université Paris 7 – Denis Diderot*, 288 pp.
- **Bejamin Sultan et Serge Janicot, 2004** : La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnières et intra-saisonnière. I : mise en place de mousson et variabilité intra-saisonnière de mise en place de convection ; *Sécheresse*, 15(4), 1-10.
- **Bonn, F. et Rochon, G., 1992** : Précis de télédétection, Volume 1. Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec, AUPELF-UREF. 512 pages.
- **Burpee, R.W., 1972**: The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of north Africa. *J. Atmos. Sci.*, 29, 77-90.
- **Burpee, R.W., 1974**: Characteristics of North African easterly waves during the summers of 1968 and 1969. *J. Atmos. Sci.*, 31, 1556-1570.
- **CIRAD & AGRHYMET, 2005**: Après la famine au Niger... Quelles actions de lutte et de recherche contre l'insécurité alimentaire au Sahel ? – Dossier de Presse ; 41 p.
- **Charney, J.G. & Stone, P.H., 1974**: Drought in the Sahel: Biogeophysical feedback mechanism. *Science*, 253, 299-302.
- **Charney, J.G., 1975**: Dynamics of deserts and droughts in the Sahel. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 101, 193-202.
- **Charney, J., W.J. Quirk, S.-H. Chow, and J. Kornfield, 1977**: A comparative study of the effects of albedo change on drought in semi-arid regions. *J. Atmos. Sci.*, 34, 1366-1385.
- **Chung, J. C., 1982**: Correlations between the Tropical Atlantic trade winds and precipitations in northeast Brazil. *Journal of Climatology*, 2(1) : 35-46.
- **Cîteau, J; Bergés, J. C.; Demarcq, H.; Mahé, G., 1988a**: Position de la Zone de Convergence a 28 N et température de surface de l'ocean. *Veille Climatique Satellitaire*, sv(21):3-7.
- **Club du Sahel et OCDE, 1998**: Études des perspectives à long terme en Afrique de l'Ouest « *Pour préparer l'avenir de l'Afrique de l'Ouest. Une vision à l'horizon 2020* », 157 p.
- **Courel M.F., 1984**: Étude de l'évolution recent des milieux sahéliens à partir des mesures fournies par des satellites. *Thèse doctorat d'État*. Paris I, 407 p.

- Courel, M., Kandel, R.S., Rasool, S.I., 1984: Surface albedo and the Sahel drought. *Nature*, 307, 528-531.
- Creutin J.D., 1979 : Méthodes d'interpolation optimale des champs hydrométéorologiques - comparaison et application à une série d'épisodes cévenols. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, l'Institut National Polytechnique de Grenoble, 174 p.
- Delhomme, J.P., 1976 : Application de la théorie des variables régionales dans les sciences de l'eau. *Thèse de Docteur-Ingénieur*, Université Paris VI.
- Demarée G.R., and C. Nicolis, 1990: Onset of Sahelian drought viewed as a fluctuation induced transition. *Quart. J.Roy.Meteor.Soc.*, 116, 221-238.
- Dhonneur G., 1985: Traité de meteorology tropical. Météo-France, Paris, 152 p.
- Diedhiou, A., S. Janicot, A. Viltard, P. de Felice and H. Laurent, 1999: Easterly wave regimes and associated convection over West Africa and the tropical Atlantic: Results from NCEP/NCAR and CEPMMT reanalyses. *Climate Dynamics*, 15, 795-822.
- Dunn, G.E., 1940 : Cyclogenesis in the tropical Atlantic. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 21, 215-229.
- Duvel J., 1990: Convection over tropical Africa and the Atlantic Ocean during northern summer. Part II: Modulation by easterly waves. *Mon. Wea.Rev.*, 118, 1855-1868.
- Eltahir, E.A.B., and C. Gong, 1996: Dynamics of wet and dry years in West Africa. *J.Climate*, 9, 1030-1042.
- Emanuel K. A., 1995: On thermally direct circulation in moist atmospheres. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1529-1534.
- Emanuel K.A., Neelin J.D. and Bretherton C.S., 1994: On large-scale circulation in convecting atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 120, 1111-1143.
- Folland, C.K., T.N. Palmer, and D.E. Parker, 1986: Sahel rainfall and worldwide sea temperature 1901-1985. *Nature* 320, 602-607.
- Fontaine, B. and S. Bigot, 1993: West African rainfall deficits and sea surface temperatures. *Int. J. Climatol.*, 13, 271-285.
- Fontaine, B., N. Philippon, and P. Camberlin, 1999 : An improvement of June-September rainfall forecasting in the Sahel based upon region April-May moist static energy content (1968-1997). *Geophysical Research Letters*, 26(14), 2041-2044.
- Gleick, P.H. 1992: Water and Conflict, Occasional Paper No. 1, for the Project on Environmental Change and Acute Conflict of the American Academy of Arts and Sciences, Cambridge, Massachusetts, and the University of Toronto (September).
- Guinko S., 1984 : Végétation de la Haute-Volta. *Thèse de Doctorat d'Etat*, Université de Bordeaux III, 364 p.
- Hamilton, R. A., and J.W. Archbold, 1945: Meteorology of Nigeria and adjacent territory, *Q.J.Geol.Soc.London*, 71, 231-265.
- H. G. Mensching, 1990: Désertification. Darmstadt, p. 55.
- Hastenrath, S; Heller, L., 1977: Dynamics of climatic hazards in Northeast Brazil. *Quartely Journal of the Royal Meteorological Society*, 103(435):77-92.
- Hodges, K.I. and C.D. Thorncroft, 1997: Distribution and statistics of African mesoscale convective weather systems based on ISCCP METEOSAT imagery. *Mon. Wea.Rev.*, 125, 2821-2837.

- **Hubert P., Carbonnel J.-P., 1987** : Approche statistique de l'aridification de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology, Amsterdam*, 95, 165-183.
- **Hubert P., Cabonnel J.-P. et Chaouche A., 1989** : Segmentation des séries hydrométéorologiques – Application à des séries de précipitations et de débits de l'Afrique de l'Ouest. *Journal of Hydrology*, 110, 349-367.
- **Isabelle Pocard, 2000** : Etude diagnostique de nouvelles données climatiques: les réanalyses. Exemples d'application aux précipitations en Afrique tropicale, *Thèse de Doctorat de Géographie (option climatologie)*, Université de Bourgogne, 242 p.
- **Jacob, F. 1999** : Utilisation de la télédétection courtes longueurs d'onde et infrarouge thermique à haute résolution spatiale pour l'estimation des flux d'énergie à l'échelle de la parcelle agricole: *Institut National de la Recherche Agronomique*, Avignon, 268 p.
- **Janicot, S., 1992 a)**: Spatiotemporal variability of West African rainfall. Part II: Associated surface and air mass characteristics. *J. Climate*, 5, 499–511.
- **Janicot, S., 1992 b)**: Spatio-temporal variability of West African rainfall. Part I: Regionalisation and typings. *J. Climate*, 5, 489-497.
- **Janicot, S. and B. Sultan, 2001**: Intra-seasonal modulation of convection in the West African monsoon. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 523-526.
- **Janicot, S., e Fontaine B., 1993**: L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récent des précipitations en Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, 1, 28-49.
- **Janicot, S., S. Trzaska & I. Pocard, 2001**: Summer Sahel-ENSO teleconnection and decadal time scale TSM variations. *Climate Dynamics*, in press.
- **Kalnay, E., and Coauthors, 1996** : NCEP/NCAR 40-year Reanalysis projet. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- **Lamb, P., 1978**: Large-scale tropical Atlantic circulations patterns associated with Subsaharan weather anomalies. *Tellus*, 30(3), 240-251.
- **Lamb, P.J., 1983**: West African water variations between recent contrasting sub-saharan droughts. *Tellus*, 35, 198-212.
- **Le Barbé, L., T. Lebel, and D. Tapsoba, 2001**: Rainfall variability in West Africa during the years 1950-1990. *J. Climate*, In print.
- **Le Houérou, H.N., 1989**: An assessment of the economic feasibility of fodder shrubs plantation (with particular reference to Africa). p.603-630, in: C.M. McKell (ed) *The Biology and Utilization of Shrubs*. New York: Academic Press
- **Leisinger, Klaus M., Schmitt, Karin, 1995**: Survival in the Sahel: an Ecological and Developmental Challenge. International Service for National Agricultural Research. Den Haag.
- **Lebel T., A. Diedhiou A., H. Laurent., 2002**: Seasonal cycle and interannual variability of the Sahelian rainfall at hydrological scales. *Journal of Geophysical Res.*
- **Luquet, D., 2002** : Suivre de l'état hydrique des plantes par infrarouge thermique - analyse expérimentale et modélisation 3d de la variabilité des températures au sein d'une culture en rang de cotonniers: *Institut National Agronomique Paris-Garignon, Paris*.
- **Mahé, G., 1993** : Les écoulements fluviaux sur la façade Atlantique de l'Afrique, Etude des éléments du bilan hydrique et variabilité interannuelle, Analyse de situations hydroclimatiques moyennes et extrêmes. *Etudes et Thèses*, edn Orstom, Paris.
- **Mathon V., and H. Laurent, 2001** : Life of the Sahelian mesoscale convective cloud systems. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127, 377-406.



- **Mitchell, T.P. and J.M. Wallace, 1992** : The annual cycle in equatorial convection and sea surface temperature. *J. Climate*, 5, 1140-1156.
- **Moretin, P.A., et TOLOI, C.M., 1987** : Séries temporais : Métodos quantitativos. 2ªed. São Paulo, 136 p.
- **Moron, M. A., 1994**: Fauna de Coleoptera Lamellicornia en las montañas del noreste de Hidalgo, Mexico. *Acta Zoologica Mexicana* (n.s.), 63, 7-59.
- **Moura, A. D.; Shukla, J., 1981** : On the dynamics of the droughts in Northeast Brazil: Observations, theory and numerical experiments with a general circulations model. *Journal of the Atmospheric Science*, 38(12):2653-2673.
- **Nemani, R.R., Keeling, C.D., Hashimoto, H., Jolly, W. M., Piper, S.C., Tucker, C.J., Myneni, R.B. & Running, S.W., 2003**: Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science*, 300, 1560-1563.
- **Nicholson, S.E., C.J. Tucker, and M.B. Ba., 1998**: Desertification, drought, and surface vegetation: An example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society* 79:815-829.
- **Nonguierma, A. & Royer A., 2004** : Utilisation de l'observation spatiale pour le suivi de la dynamique de végétation au Sahel. *Agrhymet*, 12 p.
- **Palmer, T. N., 1986**: Influence of the Atlantic, Pacific and Indian Oceans on Sahel rainfall. *Nature*, 322, 251-253.
- **Peixoto, J.P. and A.H. Oort, 1992** : Physics of Climate, *American Institute of Physics, New York*
- **Philippon N., 2002**: Une nouvelle approche pour la prévision statistique des précipitations saisonnières en Afrique de l'Ouest et de l'Est : méthodes, diagnostics (1968-1998) et applications (2000 – 2001). *Thèse Doctorat Université de Bourgogne*, 241 p.
- **Philippon N. and B. Fontaine, 2001**: The relationship between the Sahelian and previous second Guinean rainy seasons: a monsoon regulation by soil wetness. *Annales Geophysicae*.
- **Philander, S.G.H., D. Gu, D. Halpern, G. Lambert, N.C. Lau, T. Li and R.C. Pacanowski, 1996**: Why the ZCIT is mostly north of the Equator. *J. Climate*, 9, 2958-2972.
- **Plum, R.A. & A.Y. Hou, 1992** : The response of a zonally symmetric atmosphere to subtropical thermal forcing. *J. Atmos. Sci.*, 49, 1790-1799.
- **Ranyère S. Nóbrega, Enio P. Souza & Enilson P. Cavalcanti, 2006**: Energia estática na atmosfera sobre o Nordeste do Brasil: Fluxo e variação sazonal de energia. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, 10(1), 132-139.
- **Redelsperger J-L. et Al., 2002** : Livre Blanc – La mousson ouest africaine et ses composantes ; 54p.
- **Reed, R.J., D. Norquist & E.E. Recker, 1977**: The structure and properties of African wave disturbances as observed during Phase III of GATE. *Mon. Wea. Rev.*, 105, 317-333.
- **Relatório Mundial do Desenvolvimento Humano, 2005**: ONU; Capítulo 5: Tendências Demográficas; 244-247.
- **Riehl, H., 1945**: Waves in the easterlies and the polar front in the Tropics, *Chicago Univ., Dept. of Meteorology*, 79 p.
- **Robert Kandel, 1992** : Le bilan radiatif de la Terre ; *La Recherche*, n°241
- **Ropelewski, C., Halpert, M., 1989**: 'Precipitation patterns associated with the high index phase of the Southern Oscillation', *J. Climate*, 2, 268-283.
- **Semazzi, F.H., B.Burns, N.H. Lin, and J.K. Schemm, 1996**: A MCG study of teleconnections between the continental climate of Africa and global sea surface temperatures anomalies. *J. Climate*, 9(10), 2480-2497.

-
- Semazzi, F.H., and L. Sun, 1977: The role of orography in determining the Sahelian climate. *Int. J. Climatol.*, 17, 581-596.
 - Sikka, D. R.; Gadgil, S., 1985: On the maximum cloud zone and the ITCZ over indian longitudes during the Southwest monsoon. *Tropical Ocean-Atmosphere Newsletter* sv (31):4-5.
 - Snijders, F.L., 1986: Land use inventory of Mozambique. *Série Terra e Água do INIA. Comunicação nº43. Maputo-Moçambique.*
 - Spiegel, M.R., 1977: Estatística: resumo da teoria. 2ªed. São Paulo, McGraw do Brasil, LTDA, 580 p. (coleção Schaum).
 - Stendel M. and Arpe K., 1997: Evaluation of the hydrological in reanalysis and observations. *Report No. 228, Max Planck Institute of Meteorology, Hamburg.*
 - Sultan B. et S. Janicot, 2000: Abrupt Shift of the ITCZ over West Africa and intra-seasonal variability. *Geophysical Research Letter*, 27, 20, 3353-3356.
 - Sultan B. et S. Janicot, 2003: The West African monsoon dynamics, Part II : The "pre-onset" and the "onset" of the summer monsoon. *Journal of Climate*, 16, 3407-3427.
 - Tanaka, M., Weare B.C., Navato A.R. e Newell R.E., 1975: Recent African rainfall patterns. *Nature*, 255, 201-203.
 - Tapsoba, D., 1997: Caractérisation événementielle des régimes pluviométriques Ouest Africains et de leur récent changement. *Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-XI(Orsay)*, 141 p. sans annexes.
 - Tapsoba, D., Haché, Mario, Perreault, Luc, Bobée, and Bernard, 2004: Bayesian Rainfall Variability Analysis in West Africa along Cross Section in Space-Time Grid Boxes. *J. of Climate*, 17, 1069-1082.
 - Toupet, Charles., 1975. La sédentarisation des nomades en Mauritanie centrale sahélienne, *Thèse d'État*. Paris: H. Champion
 - Trenberth, K.E., D.P. Stepaniak, J.W. Hurrell and M. Fiorino, 2001: Quality of reanalyses in the tropics. *J. Climate.*, 14, 1499-1510.
 - Trnrcroft, C.D., 1995: An idealized study of African easterly waves, III: More realistic basic states. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 121, 1589-1614.
 - Trnrcroft, C.D., and M. Blackburn, 1999: Maintenance of the African easterly jet, *Quart. J. of Roy. Met. Soc.*, 555, 763-786.
 - Vorosmarty, C.J. and B. Moore III. 1991: Modeling basin-scale hydrology in support of physical climate and global biogeochemical studies: An example using the Zambezi River. *Studies in Geophysics*, 12:271-311.
 - Waliser, D.E. and R.C. Somerville, 1994: Preferred latitude of the intertropical convergence zone. *J. Atmos. Sci.*, 51, 1691-1639.
 - Wang G. and E.A.B. Eltahir, 2000: Biosphere-atmosphere interactions over West African, II: Multiple climate equilibria. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 126, 1261-1280.
 - Wang G. and E.A.B. Eltahir, 2002: Impact of CO2 Concentration Changes on the Biosphere-Atmosphere System of West Africa, *Global Change Biology*, 8, 1169-1182.
 - Ward, M.N., 1998: Diagnosis and short-lead time prediction of summer rainfall in tropical North Africa at interannual and multi-decadal time scales. *J. Climate*, 11, 3167-3191.
 - Xie, P. and P. A. Arkin, 1997: Global Precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 2539-2558.

- **Zheng. X., and E.A.B. Elthair, 1998:** The role of vegetation in the dynamics of West African monsoons. *J. Climate*. 11(8), 2078-2096.

ANEXO 1: Principais Laboratórios implicados no Programa AMMA

França:

- ▶ CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique)
- ▶ CESBIO (Centre d'Etudes Spatiales de la Biosphère)
- ▶ CETP (Centre d'Etudes des Environnements Terrestres et Planétaires)
- ▶ CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement)
- ▶ CNRM (Centre National de Recherches Météorologiques)
- ▶ CRC (Centre de Recherches de Climatologie)
- ▶ HSM (HydroSciences de Montpellier)
- ▶ IPSL (Institut Pierre-Simon Laplace)
- ▶ LA (Laboratoire d'Aérodynamique)
- ▶ LAMP (Laboratoire de Météorologie Physique)
- ▶ LEGOS (Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiales)
- ▶ LISA (Laboratoire Inter-Universitaire des Systèmes Atmosphériques)
- ▶ LMD (Laboratoire de Météorologie Dynamique)
- ▶ LMTG (Laboratoire des Mécanismes de Transferts en Géologie)
- ▶ LOA (Laboratoire d'Optique Atmosphérique)
- ▶ LOCEAN (Laboratoire d'Océanographie et du Climat)
- ▶ LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement)
- ▶ LTHE (Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement)
- ▶ MEDIAS-France
- ▶ SA (Service d'Aéronomie)

Outros laboratórios implicados

- ▶ CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement)
- ▶ CIRED (Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement)
- ▶ DOPS (Laboratoire d'Océanographie Spatiale (DOPS/LOS), IFREMER)
- ▶ EEF (Ecologie et Ecophysiologie Forestières)
- ▶ ELICO (Ecosystèmes Littoraux et Côtiers)
- ▶ ENS (Ecole Nationale Supérieure)
- ▶ ESE (Ecotoxicité, Santé Environnementale, CNRS UMR 7146)
- ▶ GEMI (Laboratoire Génétique et évolution des Maladies Infectieuses, CNRS-IRD)
- ▶ GREMAQ (Groupe de Recherche en Économie Mathématique et Quantitative)
- ▶ IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER)
- ▶ Institut de Mathématiques
- ▶ IRT (Institut de Recherche en Informatique de Toulouse)
- ▶ LAREG (Laboratoire de REcherches en Géodésie)
- ▶ LCME (Laboratoire de Chimie Moléculaire et Environnementale)
- ▶ LDL (Laboratoire de Dynamique de la Lithosphère, UMR 5573)
- ▶ LGGE (Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement)
- ▶ LGIT (Laboratoire de Géophysique Interne et de Tectonophysique)
- ▶ LIN (Laboratoire de lutte contre les insectes nuisibles - UR 016 IRD - Caractérisation et contrôle des populations de vecteurs)
- ▶ LPCE (Laboratoire de Physique et Chimie de l'Environnement)
- ▶ LERNA (Laboratoire d'Etude et du Rayonnement de la Matière en Astrophysique)
- ▶ LPAT (Laboratoire de l'Atmosphère Tropicale)
- ▶ PBDS (Laboratoire des Processus et Bilans des Domaines Sédimentaires)
- ▶ PRODIG (Laboratoire de géomorphologie et environnement littoral)
- ▶ SISYPHE (Structure et fonctionnement des systèmes hydriques continentaux - UMR 7619)
- ▶ UrBEP/IMMTSSA
- ▶ USMM (Unité de Service 025 " Moyens à la mer et opérations navales " de l'IRD)

Alemanha :

- ▶ Leibniz Institut für Meereswissenschaften - Universität Kiel (IFM-GEOMAR)

Portugal :

- ▶ Centro Geofísico de Évora – Universidade de Évora (CGE-U.Évora)

Reino-Unido :

- Centre for Ecology and Hydrology (CEH)
- ▶ Chancellor Masters and Scholars of the University of Cambridge
- ▶ Environment Systems Science Centre (ESSC), University of Reading
- ▶ Facility for Airborne and Atmospheric Measurements (FAAM)

Estados Unidos da America :

- ▶ Atlantic Oceanic and Meteorological Laboratory (AOML)
- ▶ Earth System Research Laboratory (ESRL)
- ▶ Hurricane Research Division (HRD)
- ▶ National Centers for Environmental Prediction (NCEP)
- ▶ National Environmental Satellite, Data and Information Services (NESDIS)
- ▶ National Severe Storms Laboratory (NSSL)
- ▶ Natural Resource Ecology Laboratory (NREL)
- ▶ National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA)

Africa:

- ▶ ACMAD (African Center of Meteorological Application for Development)
- ▶ AGRHYMET (Institution Spécialisé du CILLSS ; Centre de Formation et de Recherche en Agrométéorologie, Hydrologie, Protection des Végétaux et Instruments Météorologiques et Électroniques).

Senegal :

- ▶ Centre de Recherches Tropicales de Climatologie en Afrique (CRTCA)
- ▶ Laboratoire d'Enseignement et de Recherche en Géomatique (LERG)
- ▶ Laboratoire de Physique de l'Atmosphère Siméon Fongang (LPASF)

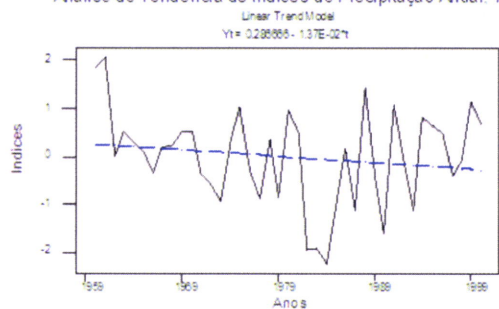
Costa do Marfin :

- ▶ Laboratoire de Physique de l'Atmosphère et de Mécanique des Fluides (LAPA-MF)

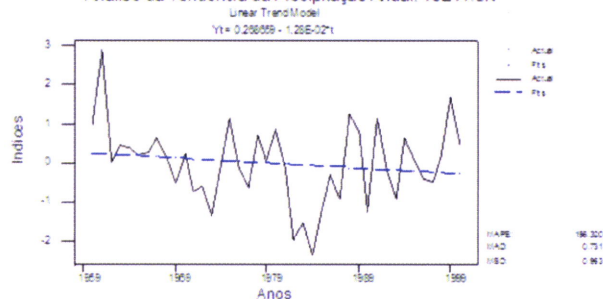
ANEXO II: Análises Estatísticas da Precipitação; Sahel-Este (15°E)

II. A) Análise da Tendência

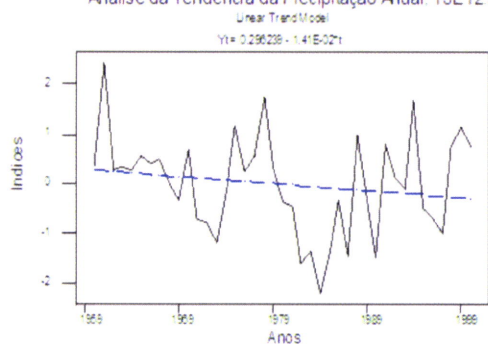
Análise de Tendência de Índices de Precipitação Anual: 15E10.5N



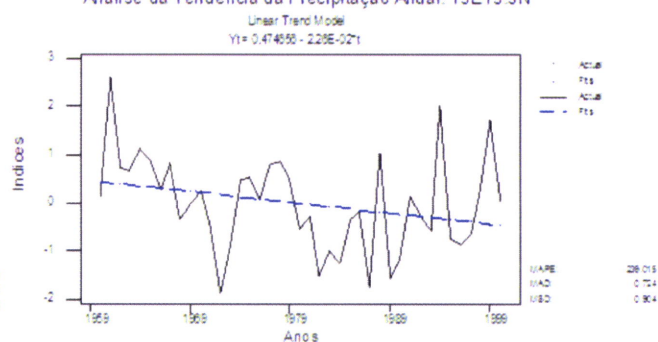
Análise de Tendência da Precipitação Anual: 15E11.5N



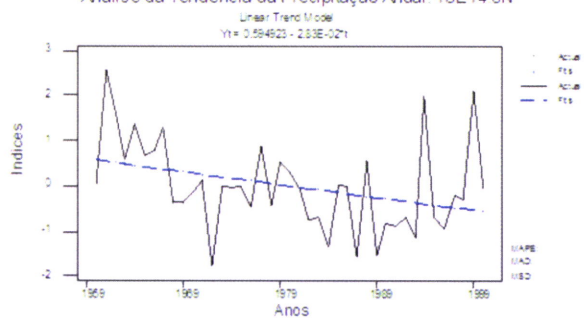
Análise de Tendência da Precipitação Anual: 15E12.5N



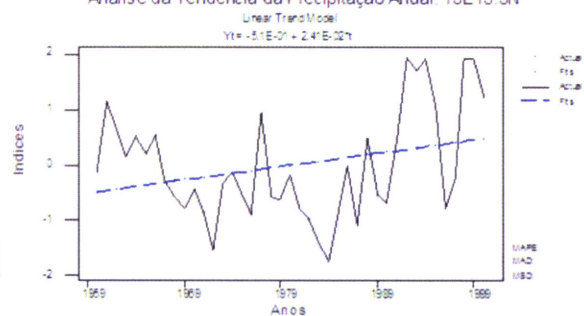
Análise de Tendência da Precipitação Anual: 15E13.5N



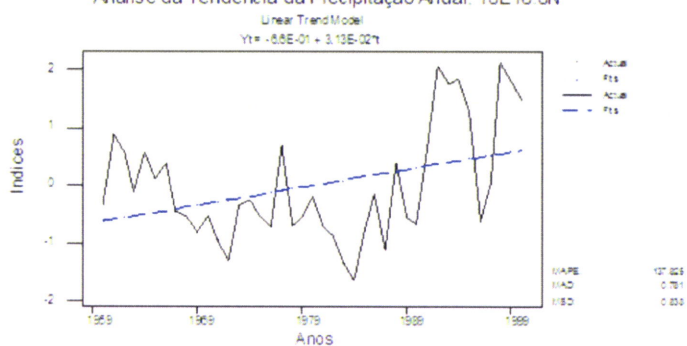
Análise de Tendência da Precipitação Anual: 15E14.5N



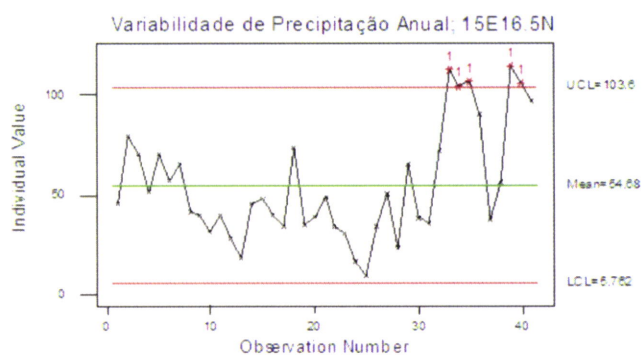
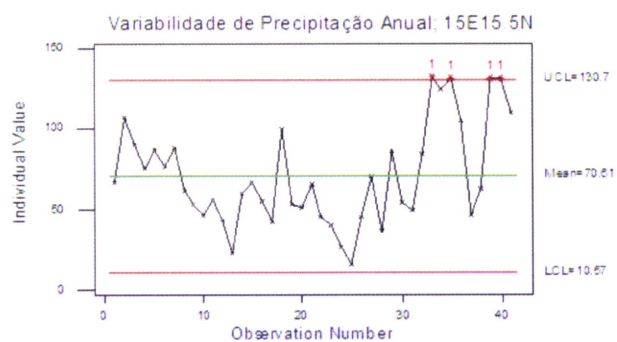
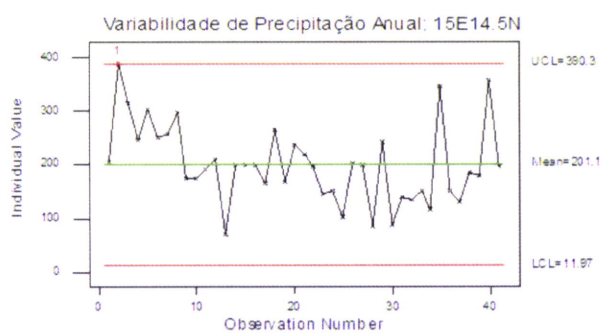
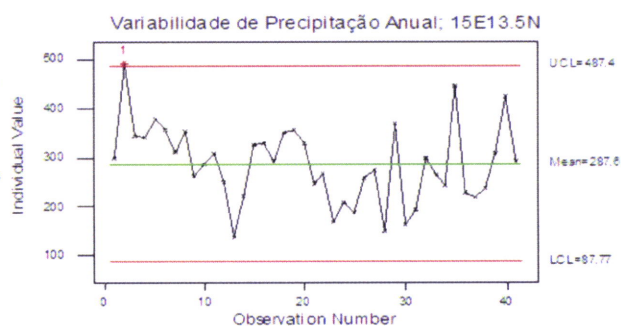
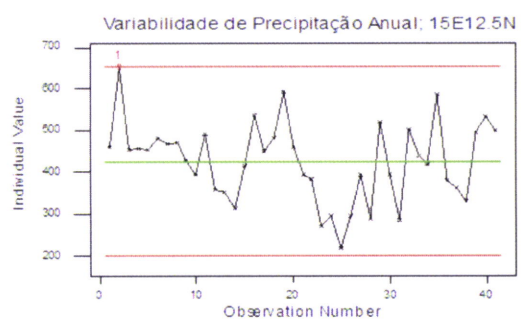
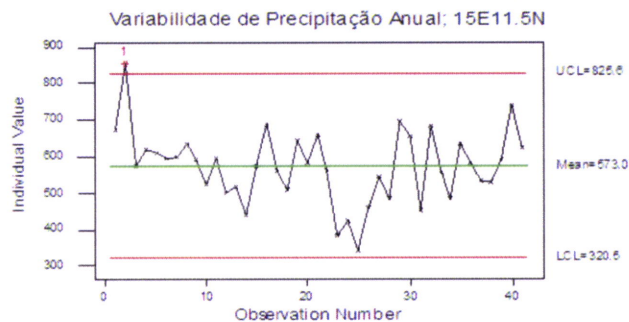
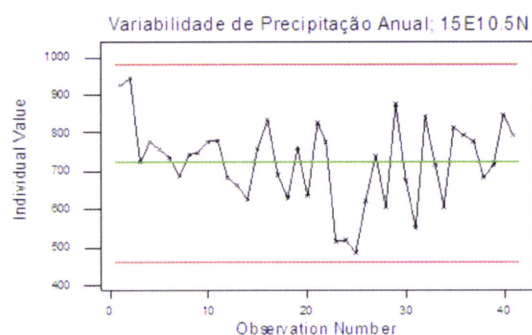
Análise de Tendência da Precipitação Anual: 15E15.5N



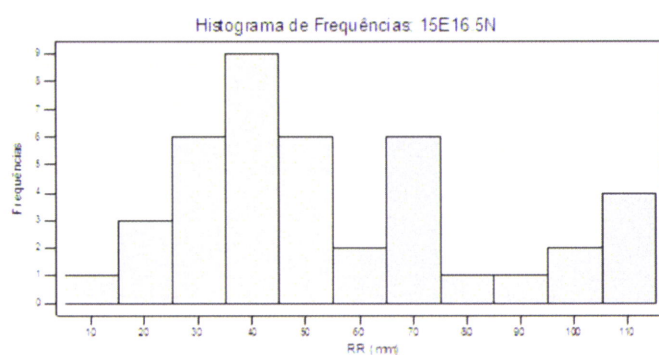
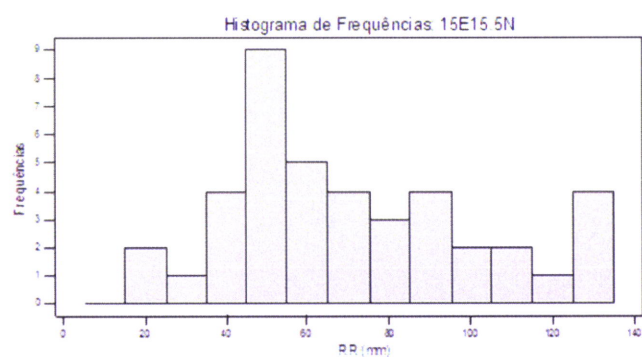
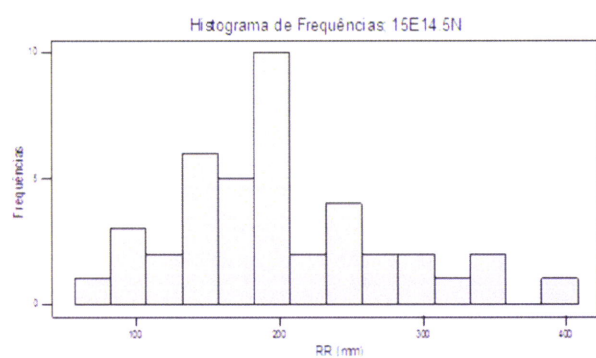
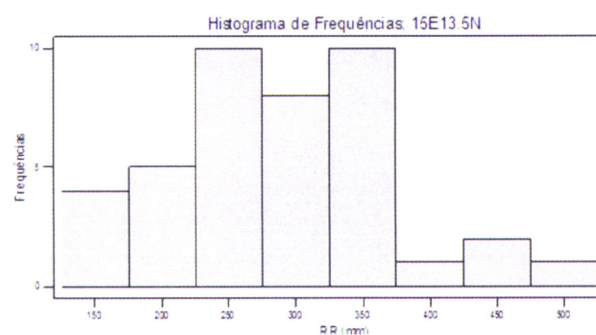
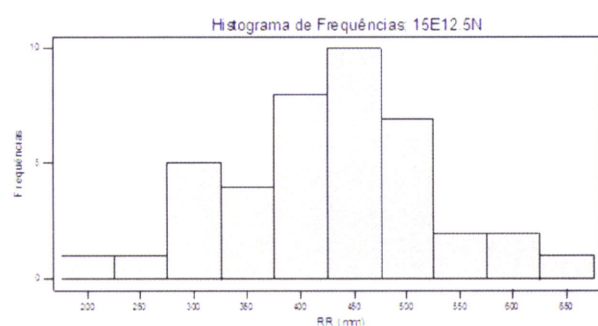
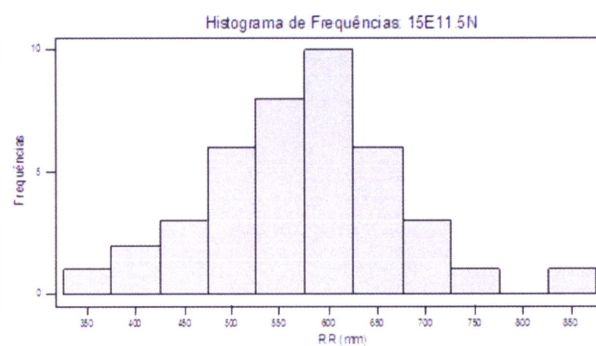
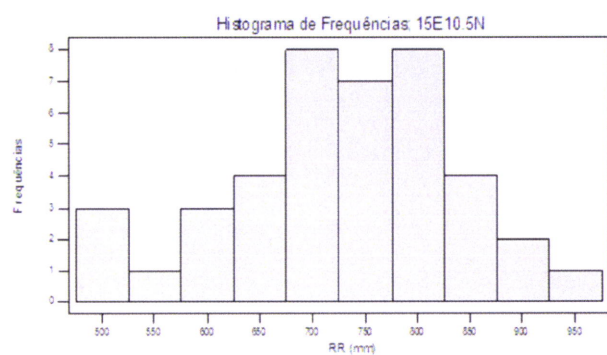
Análise de Tendência da Precipitação Anual: 15E16.5N



II.B) Variabilidade de Precipitação Anual

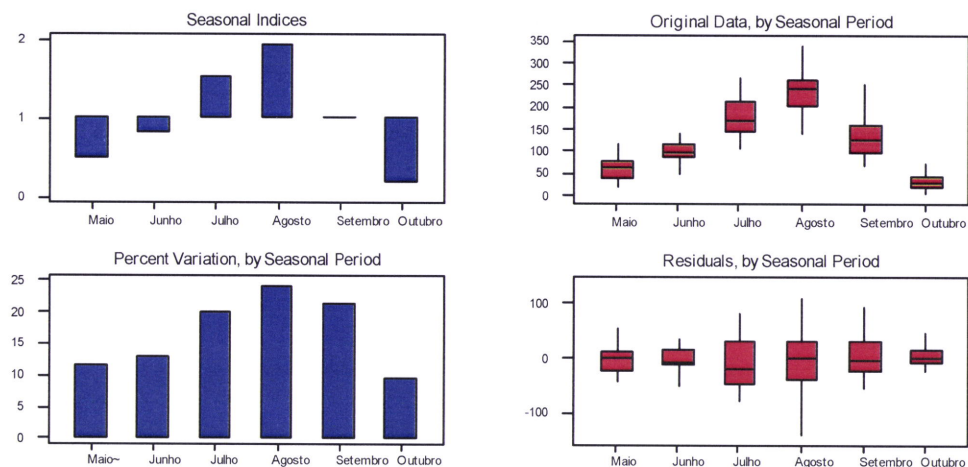


II.C) Histogramas de Frequências

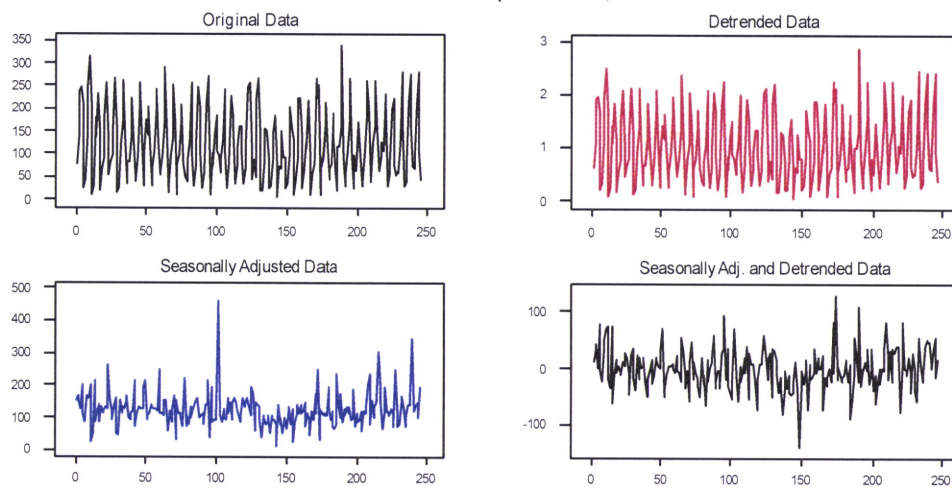


II.D) Análise Sazonal e em Componentes

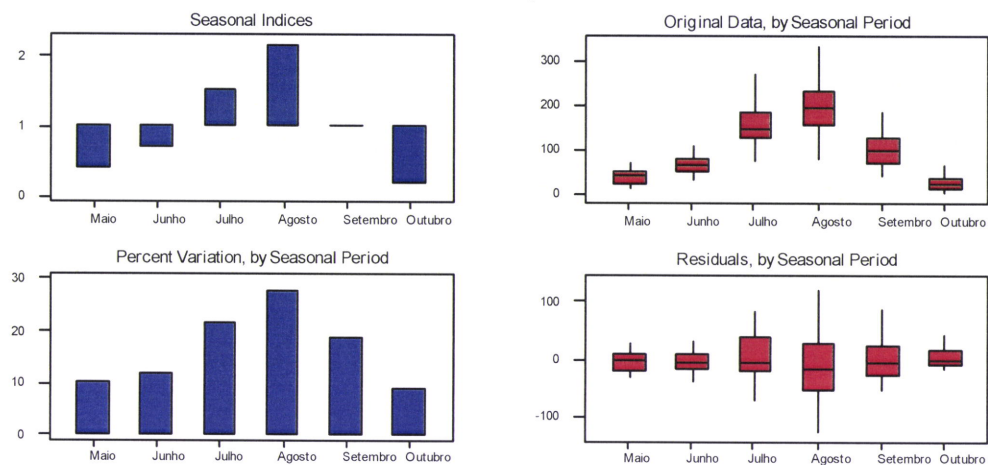
Análise Sazonal; 15E10.5N



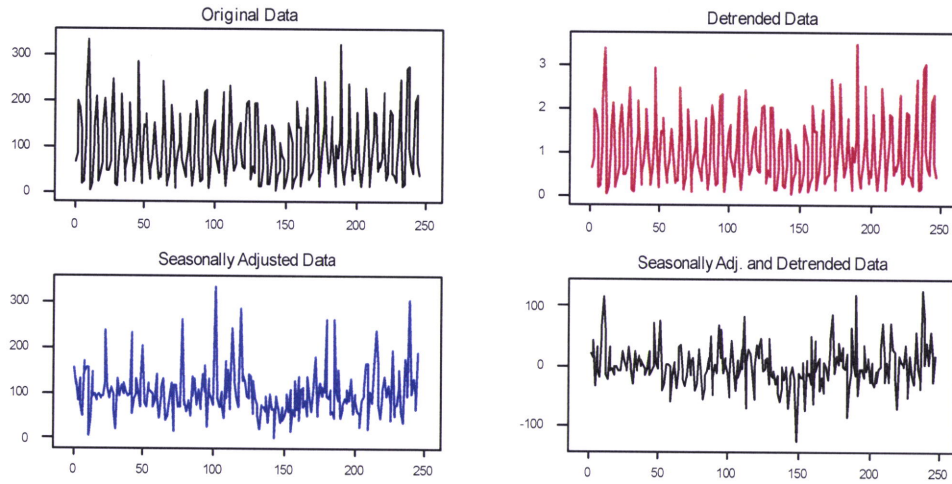
Análise em Componentes; 15E10.5N



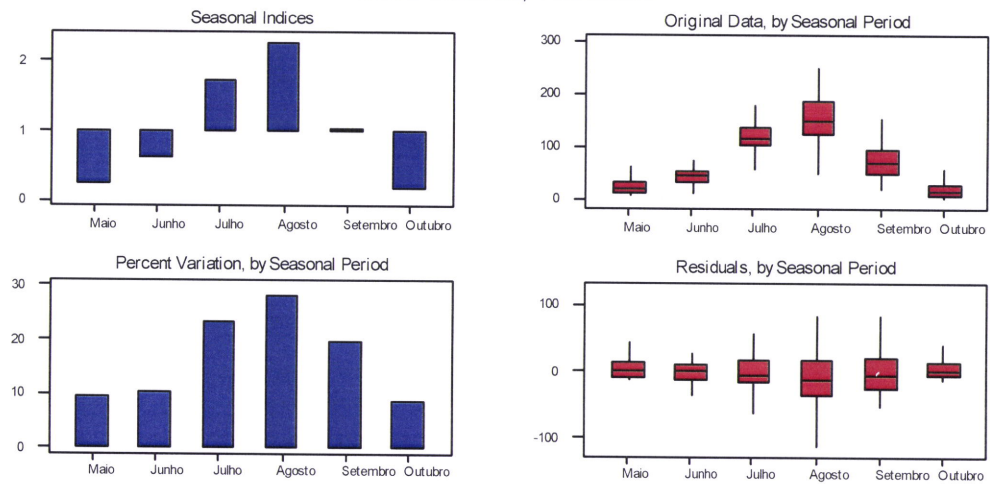
Análise Sazonal; 15E11.5N



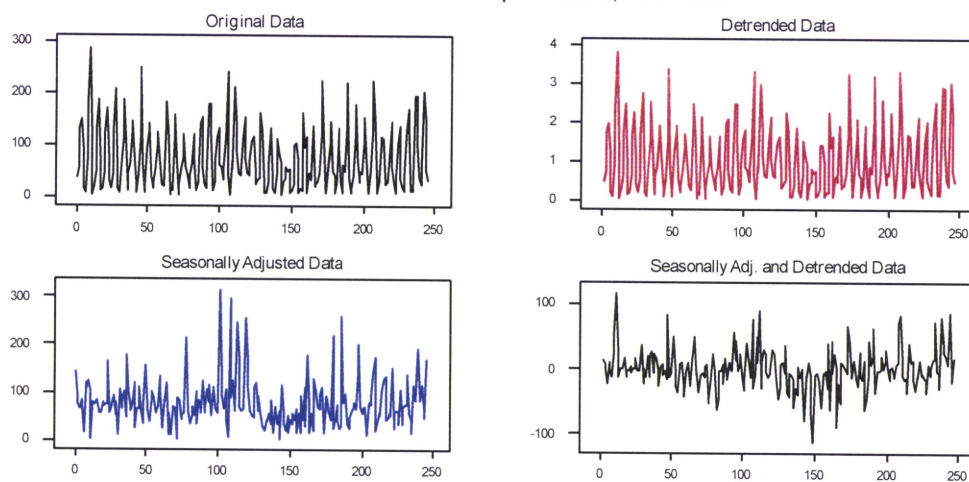
Análise em Componentes; 15E11.5N



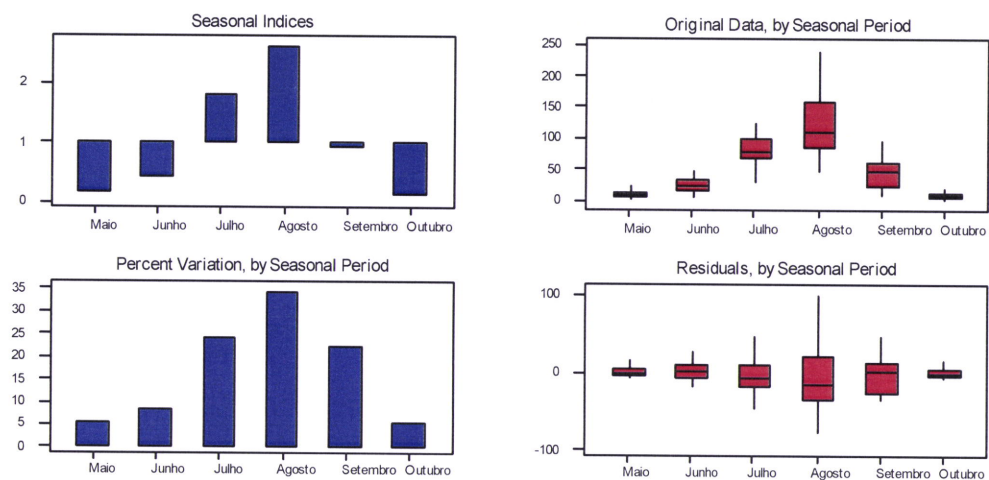
Análise Sazonal; 15E12.5N



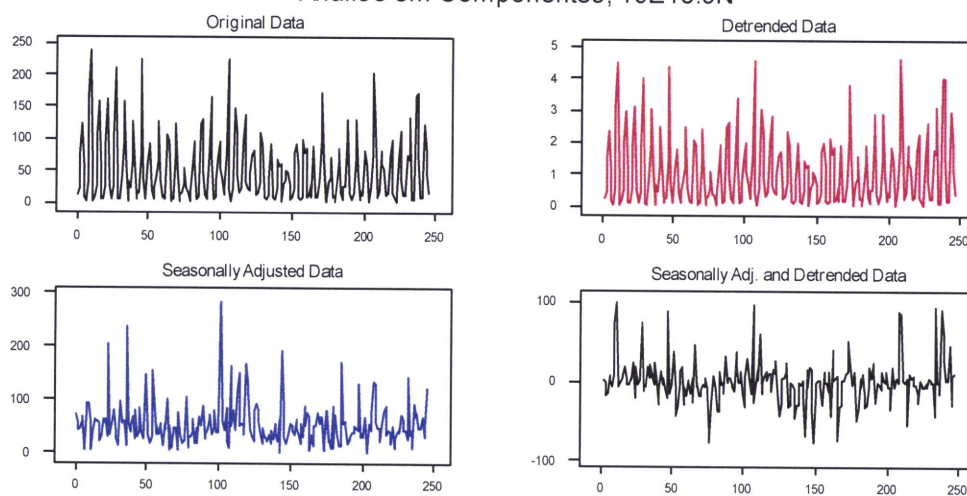
Análise em Componentes; 15E12.5N



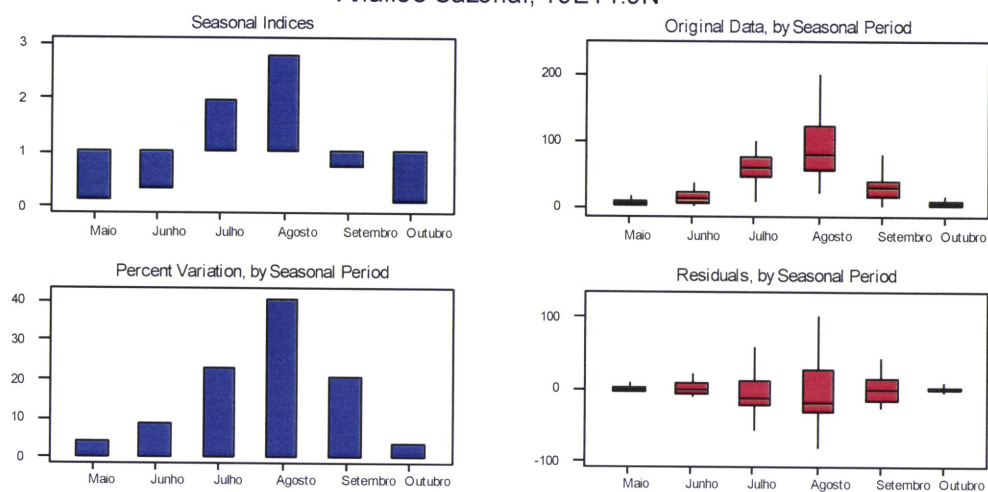
Análise Sazonal; 15E13.5N



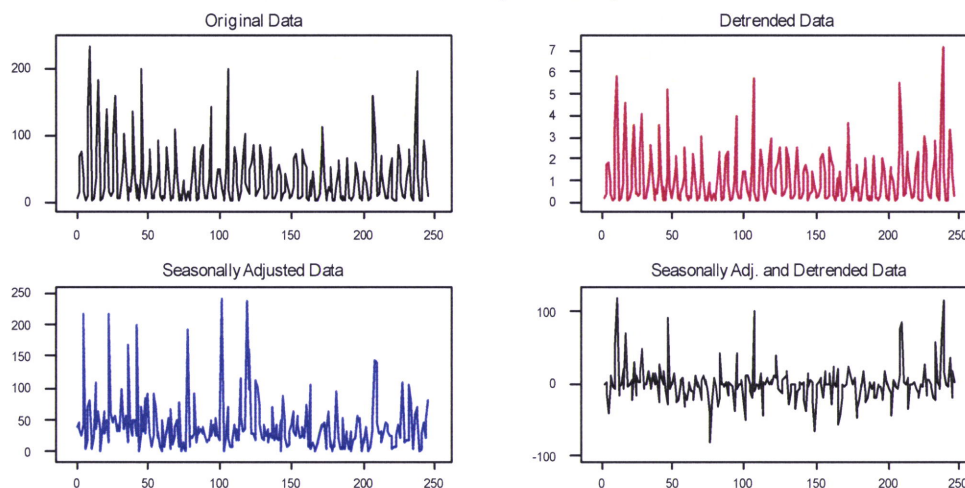
Análise em Componentes; 15E13.5N



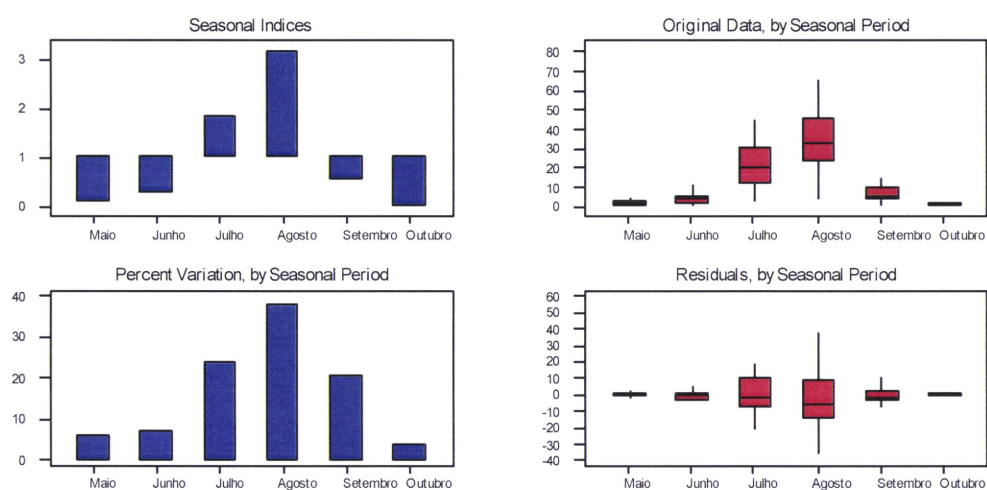
Análise Sazonal; 15E14.5N



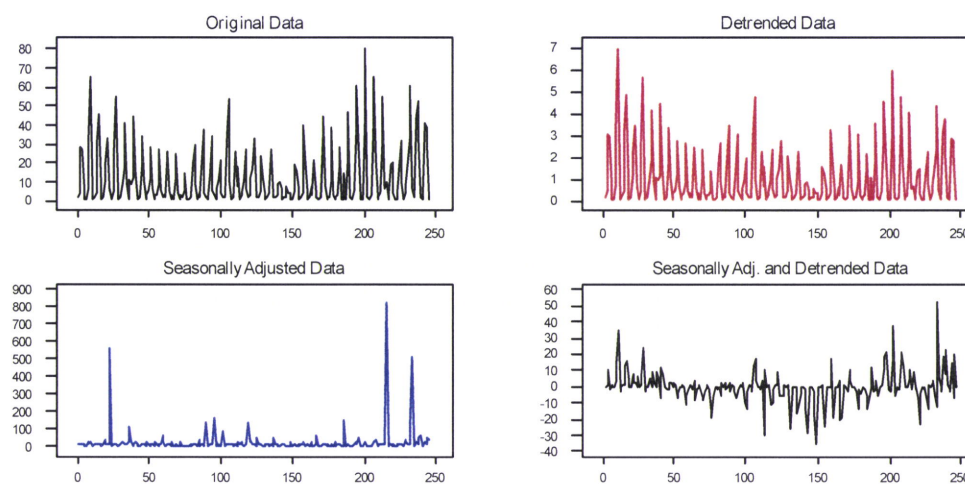
Análise em Componentes; 15E14.5N



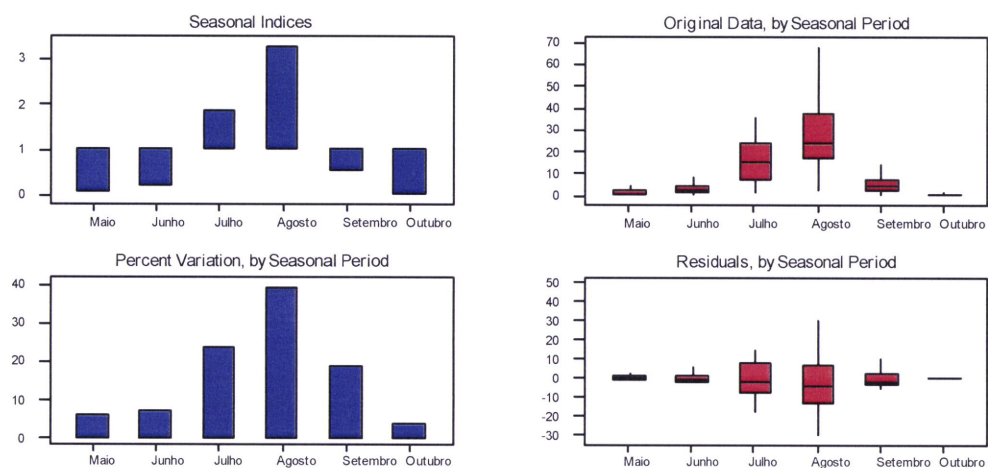
Análise Sazonal; 15E15.5N



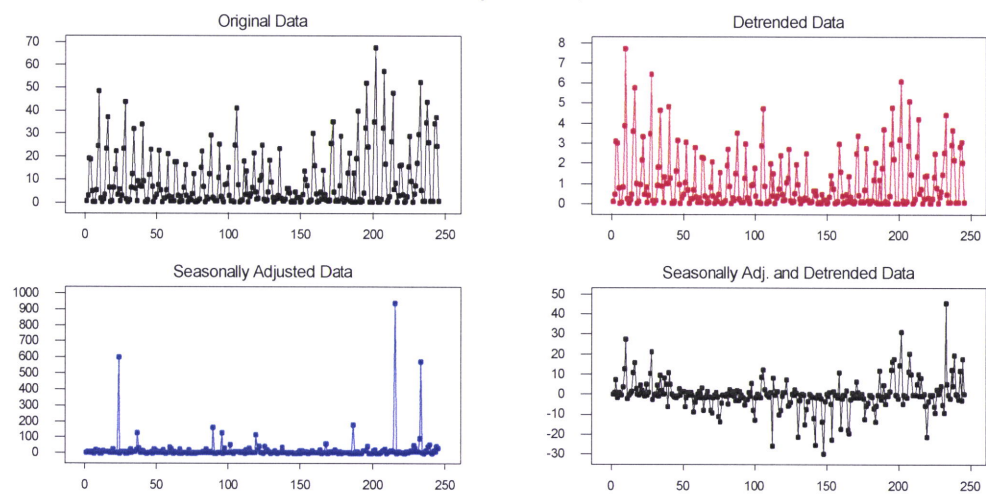
Análise em Componentes; 15E15.5N



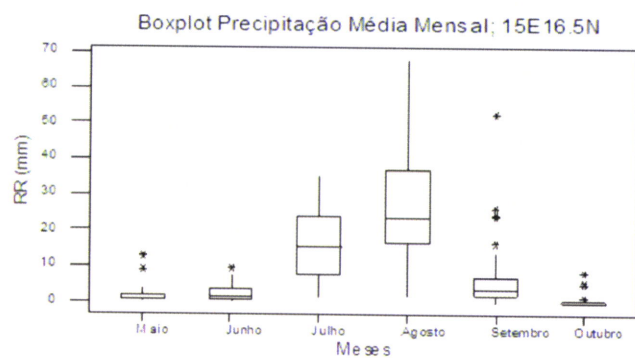
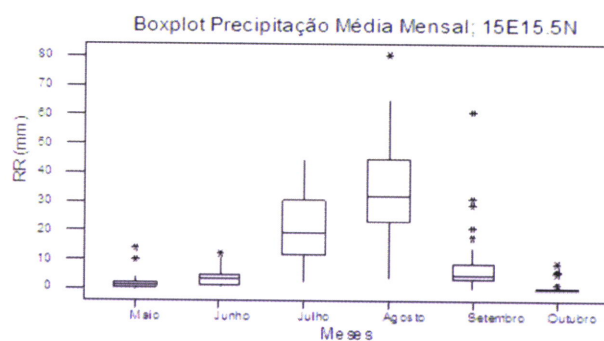
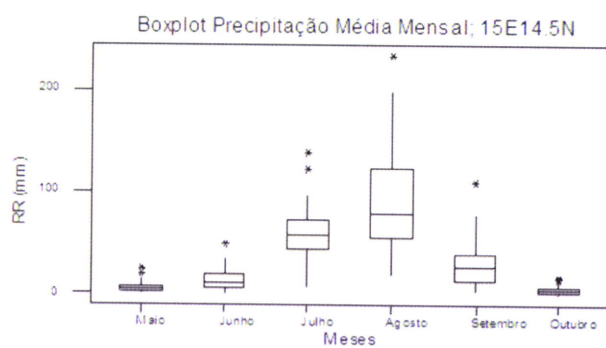
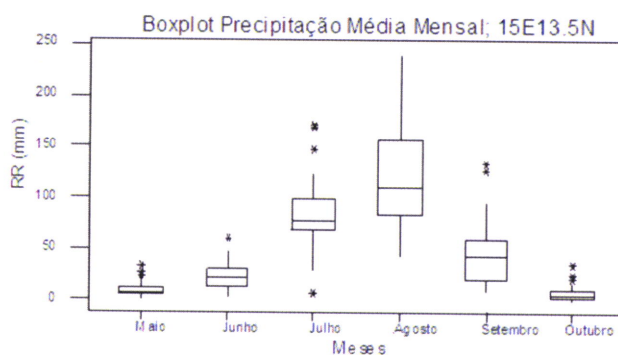
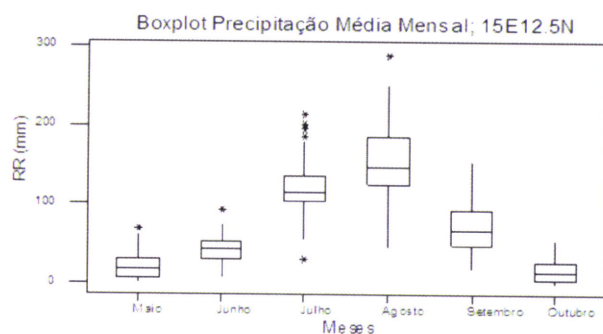
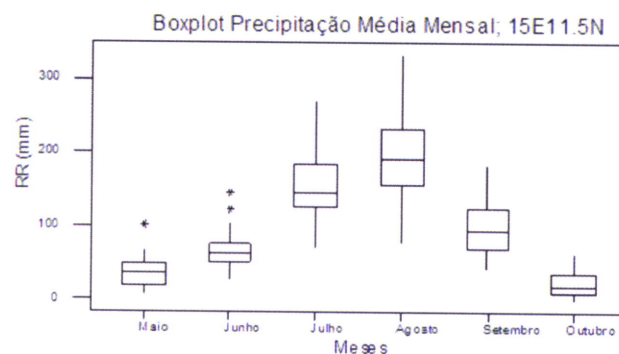
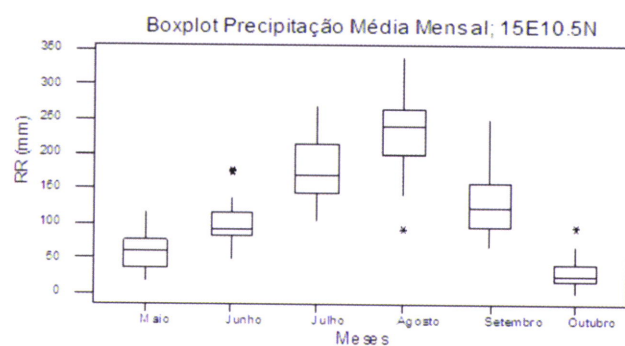
Análise Sazonal; 15E16.5N



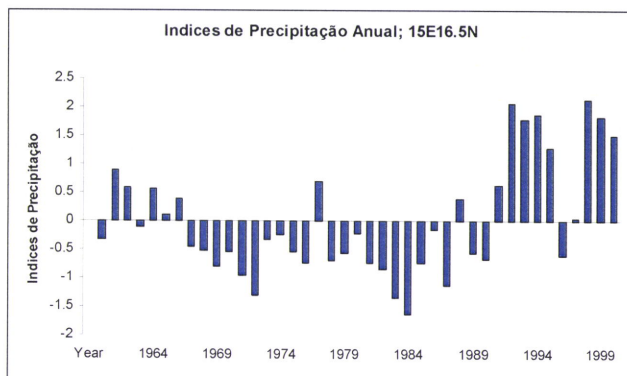
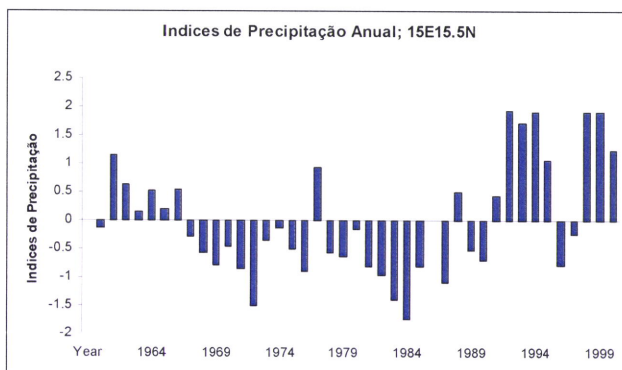
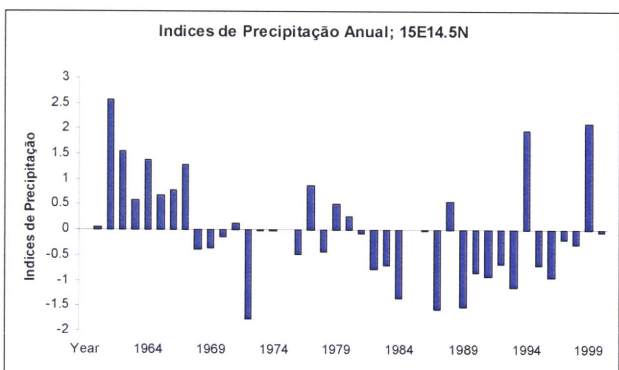
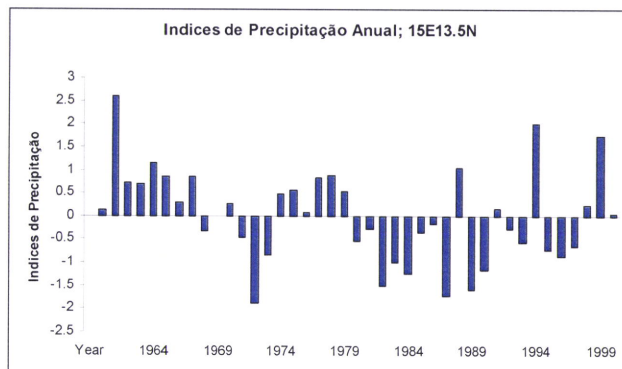
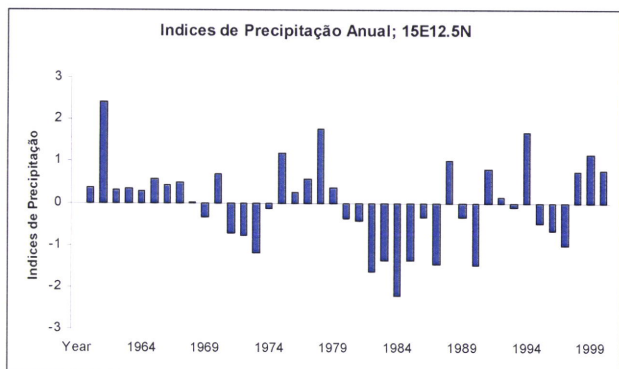
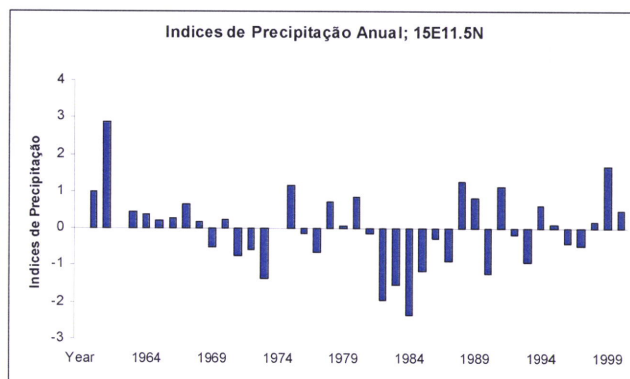
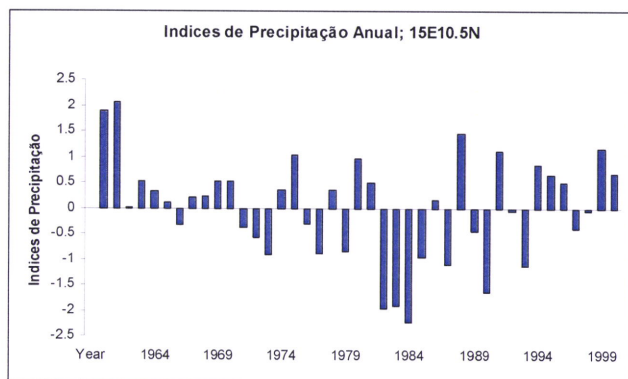
Análise em Componentes; 15E16.5N



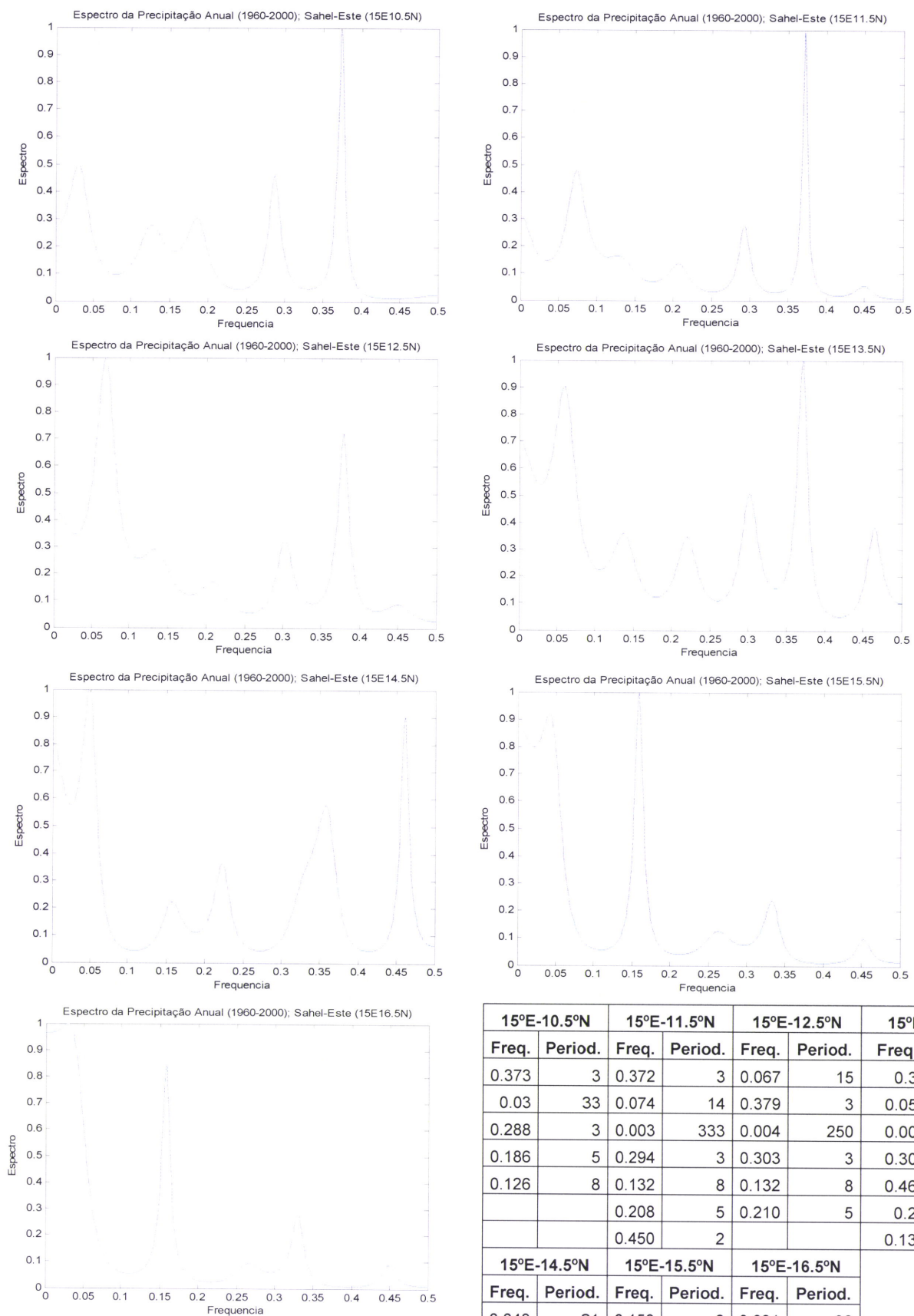
II.E) Boxplot de Precipitação Média Mensal



II.F) Índices de Precipitação Anual; Sahel-Este (15°E)



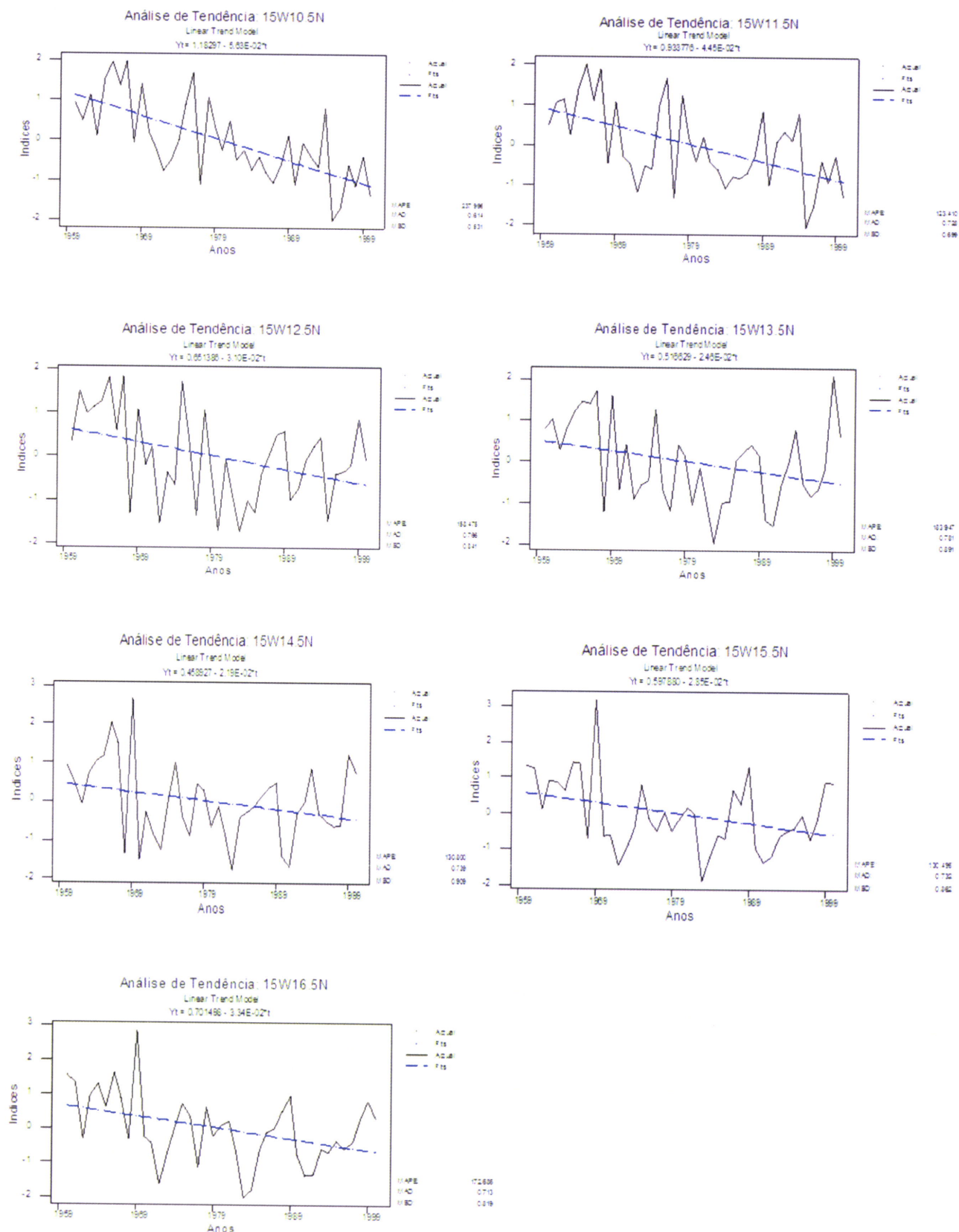
II. G) Análise Espectral da Precipitação Anual (1960-2000)



| 15°E-10.5°N | | 15°E-11.5°N | | 15°E-12.5°N | | 15°E-13.5°N | |
|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| Freq. | Period. | Freq. | Period. | Freq. | Period. | Freq. | Period. |
| 0.373 | 3 | 0.372 | 3 | 0.067 | 15 | 0.37 | 3 |
| 0.03 | 33 | 0.074 | 14 | 0.379 | 3 | 0.058 | 17 |
| 0.288 | 3 | 0.003 | 333 | 0.004 | 250 | 0.003 | 333 |
| 0.186 | 5 | 0.294 | 3 | 0.303 | 3 | 0.303 | 3 |
| 0.126 | 8 | 0.132 | 8 | 0.132 | 8 | 0.465 | 2 |
| | | 0.208 | 5 | 0.210 | 5 | 0.22 | 5 |
| | | 0.450 | 2 | | | 0.137 | 7 |
| 15°E-14.5°N | | 15°E-15.5°N | | 15°E-16.5°N | | | |
| Freq. | Period. | Freq. | Period. | Freq. | Period. | | |
| 0.048 | 21 | 0.158 | 6 | 0.031 | 32 | | |
| 0.461 | 2 | 0.042 | 24 | 0.159 | 6 | | |
| 0.002 | 500 | 0.002 | 500 | 0.331 | 3 | | |
| 0.358 | 3 | 0.333 | 3 | 0.266 | 4 | | |
| 0.223 | 4 | 0.262 | 4 | 0.449 | 2 | | |
| 0.157 | 6 | 0.453 | 2 | | | | |

ANEXO III: Análises Estatísticas da Precipitação; Sahel-Oeste (15°W)

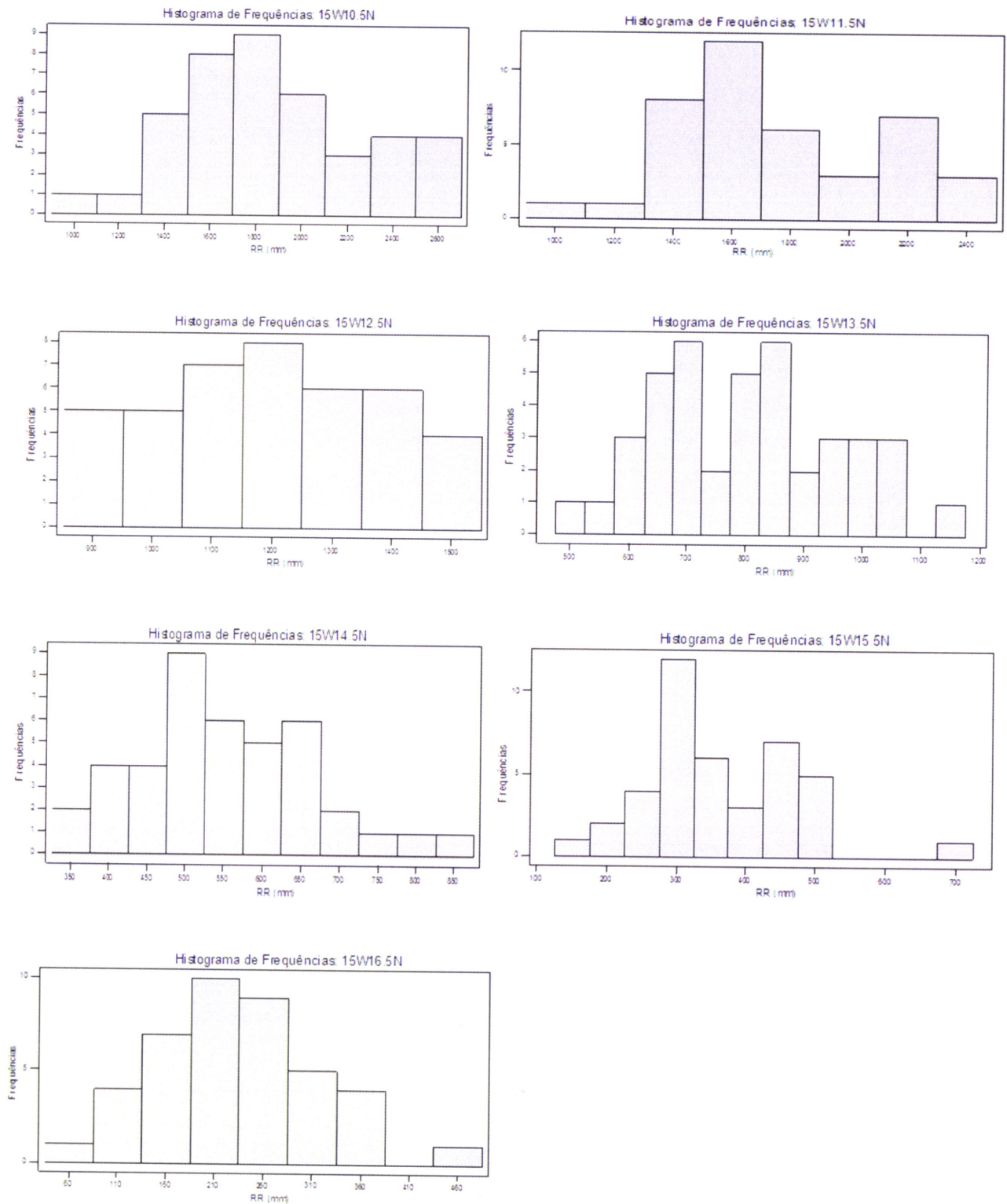
II.A) Análise da Tendência



III.B) Variabilidade de Precipitação Anual

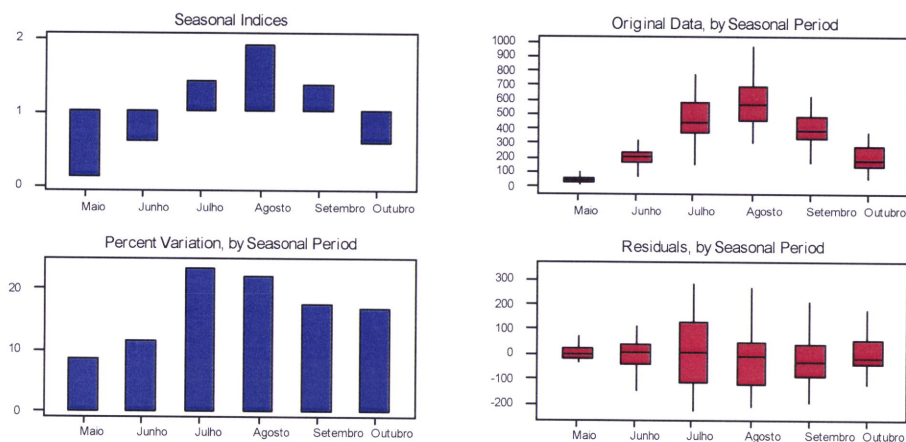


III.C) Histogramas de Frequências de Precipitação Anual

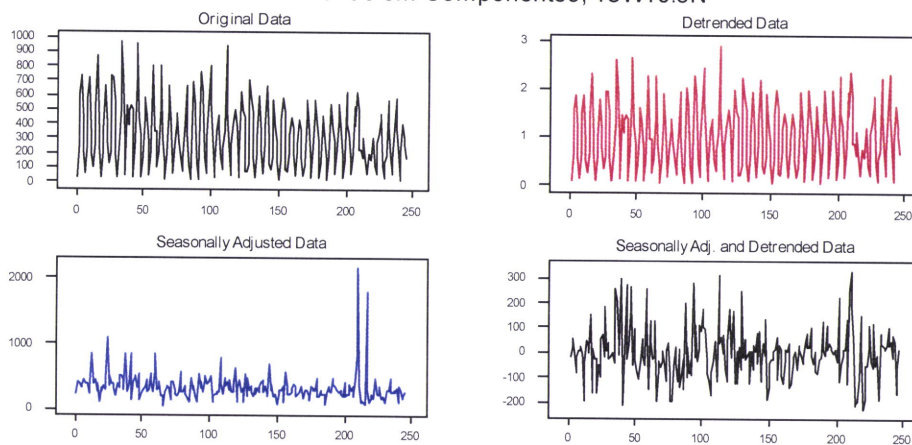


III.D) Análise Sazonal e em Componentes

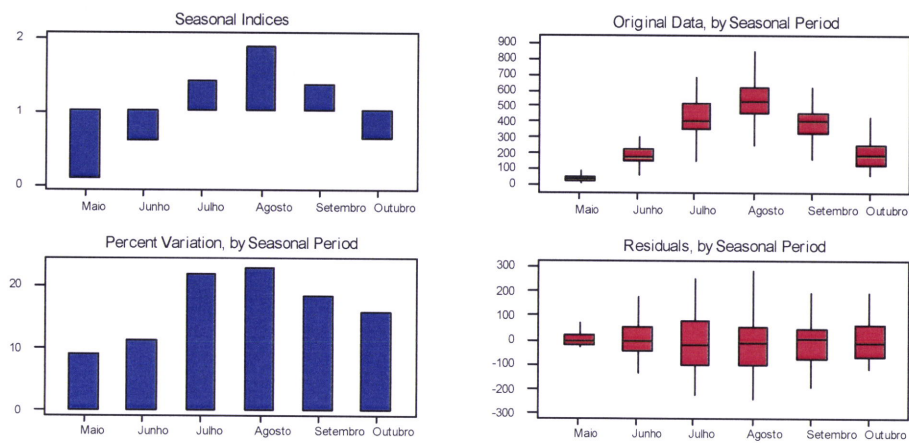
Análise Sazonal; 15W10.5N



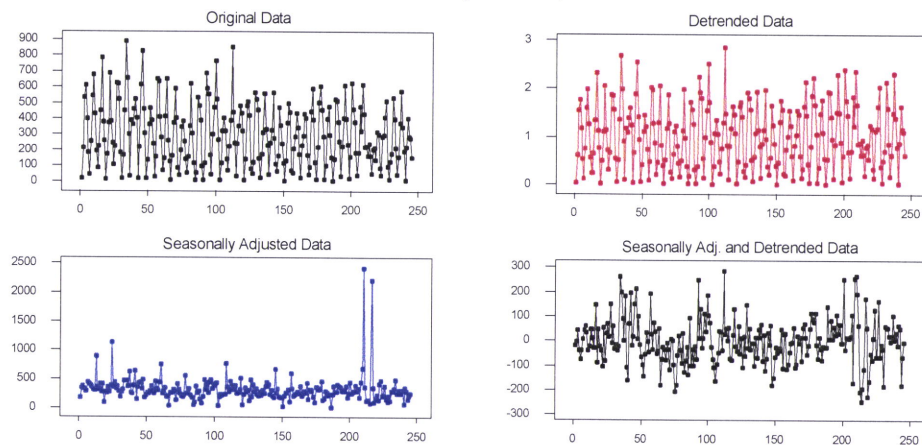
Análise em Componentes; 15W10.5N



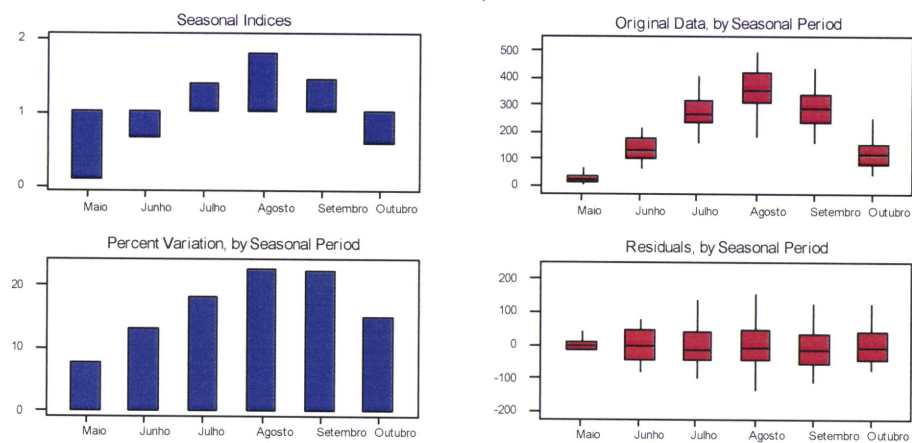
Análise Sazonal; 15W11.5N



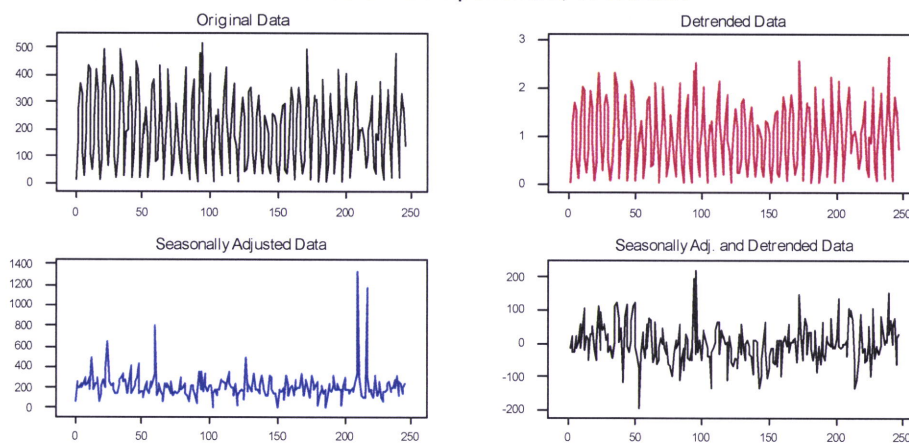
Análise em Componentes; 15W11.5N



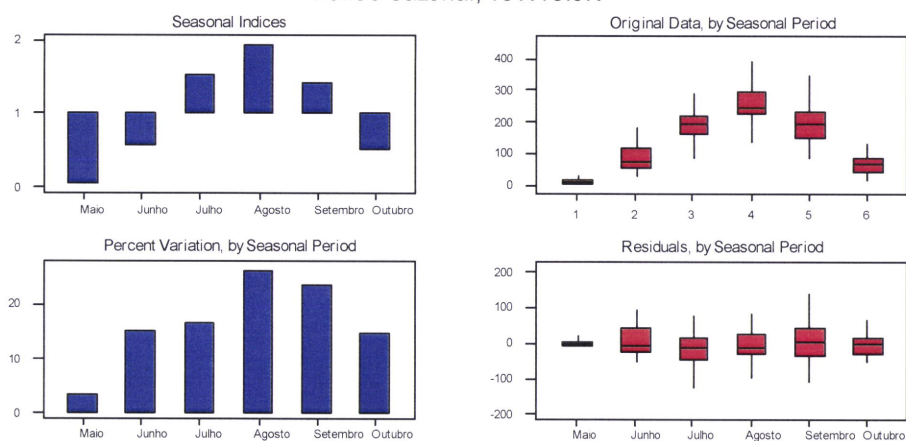
Análise Sazonal; 15W12.5N



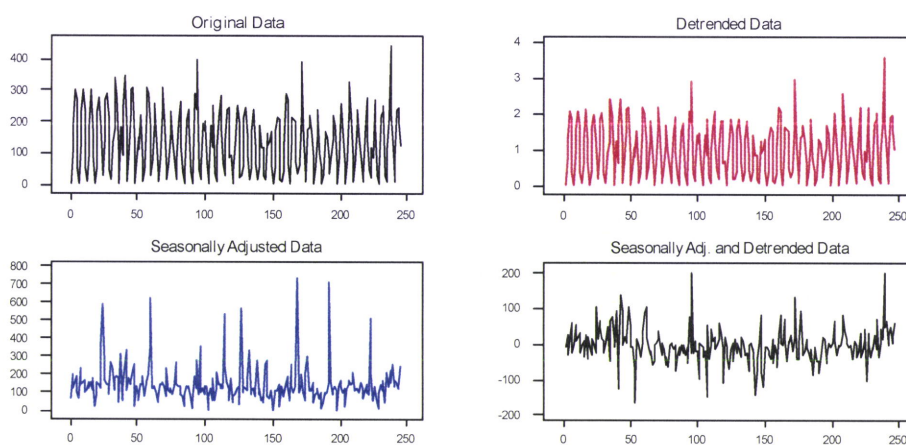
Análise em Componentes; 15W12.5N



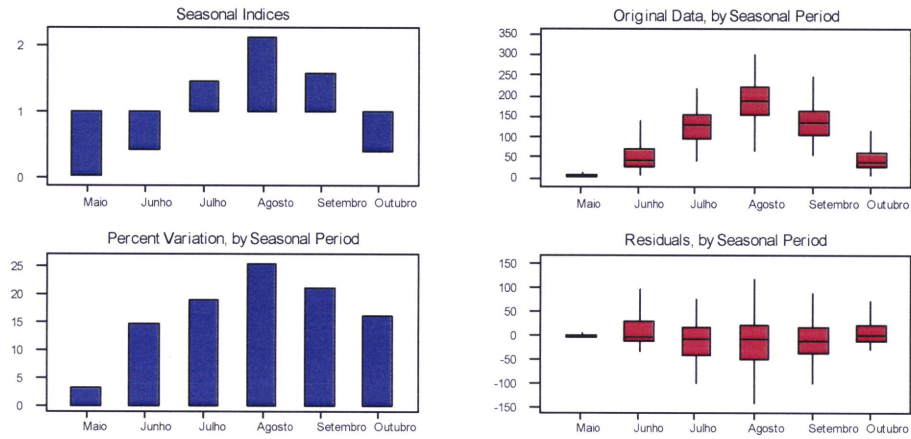
Análise Sazonal; 15W13.5N



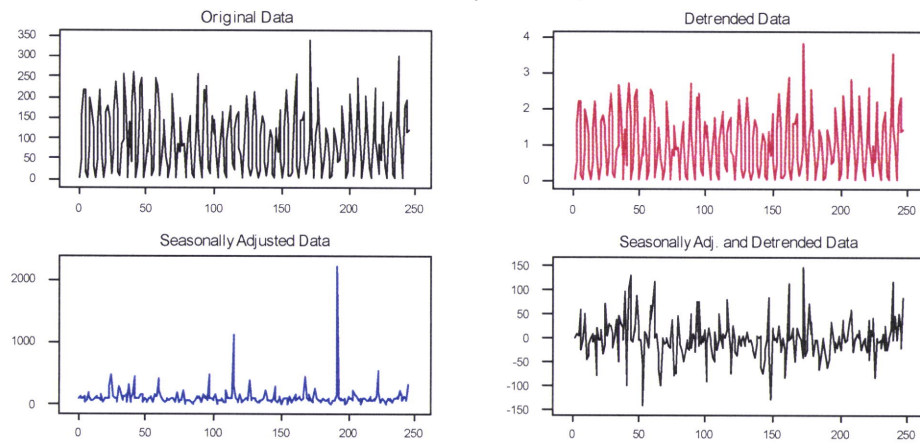
Análise em Componentes; 15W13.5N



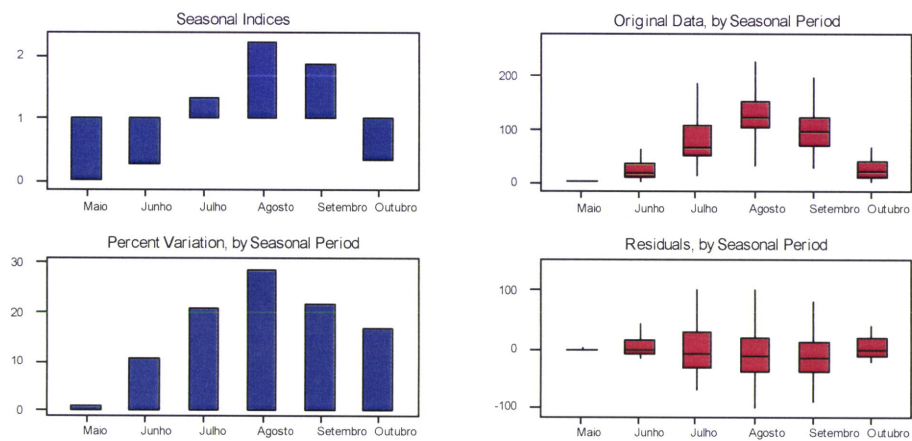
Análise Sazonal; 15W14.5N



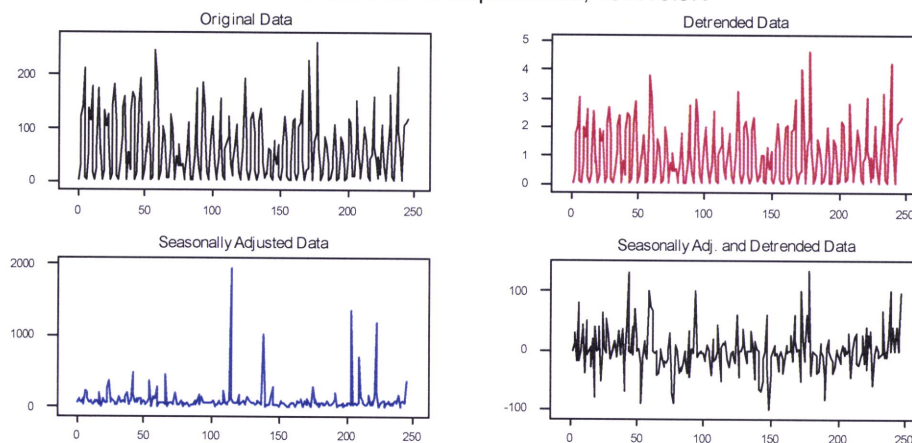
Análise em Componentes; 15W14.5N



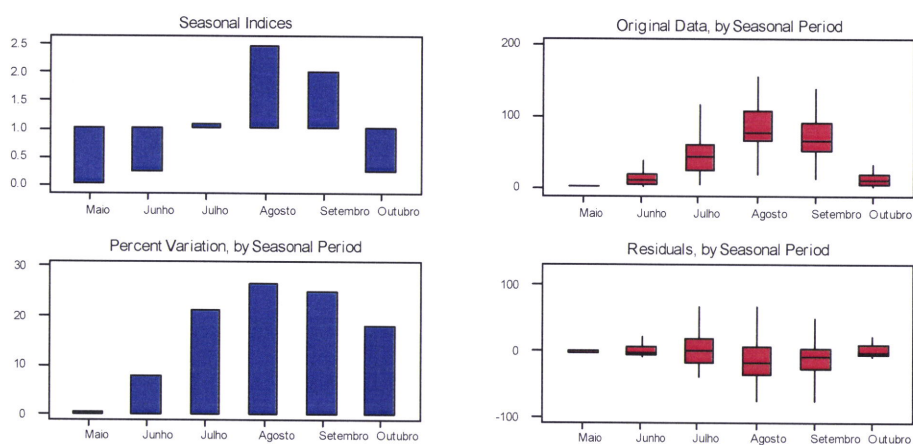
Análise Sazonal; 15W15.5N



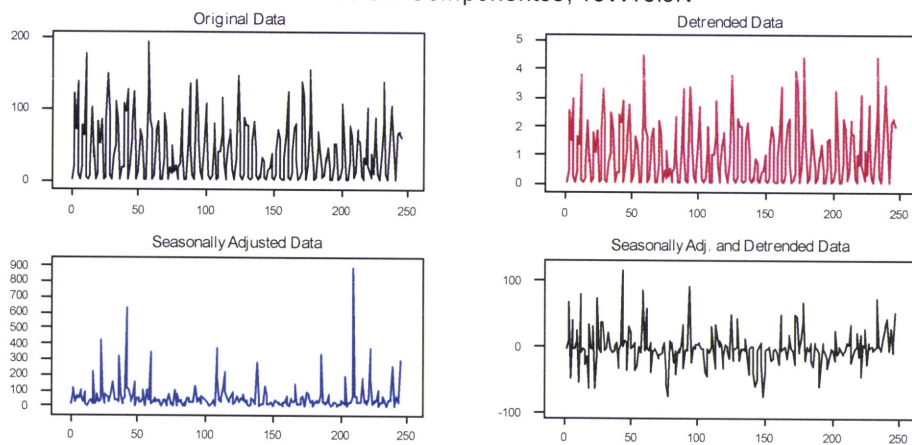
Análise em Componentes; 15W15.5N



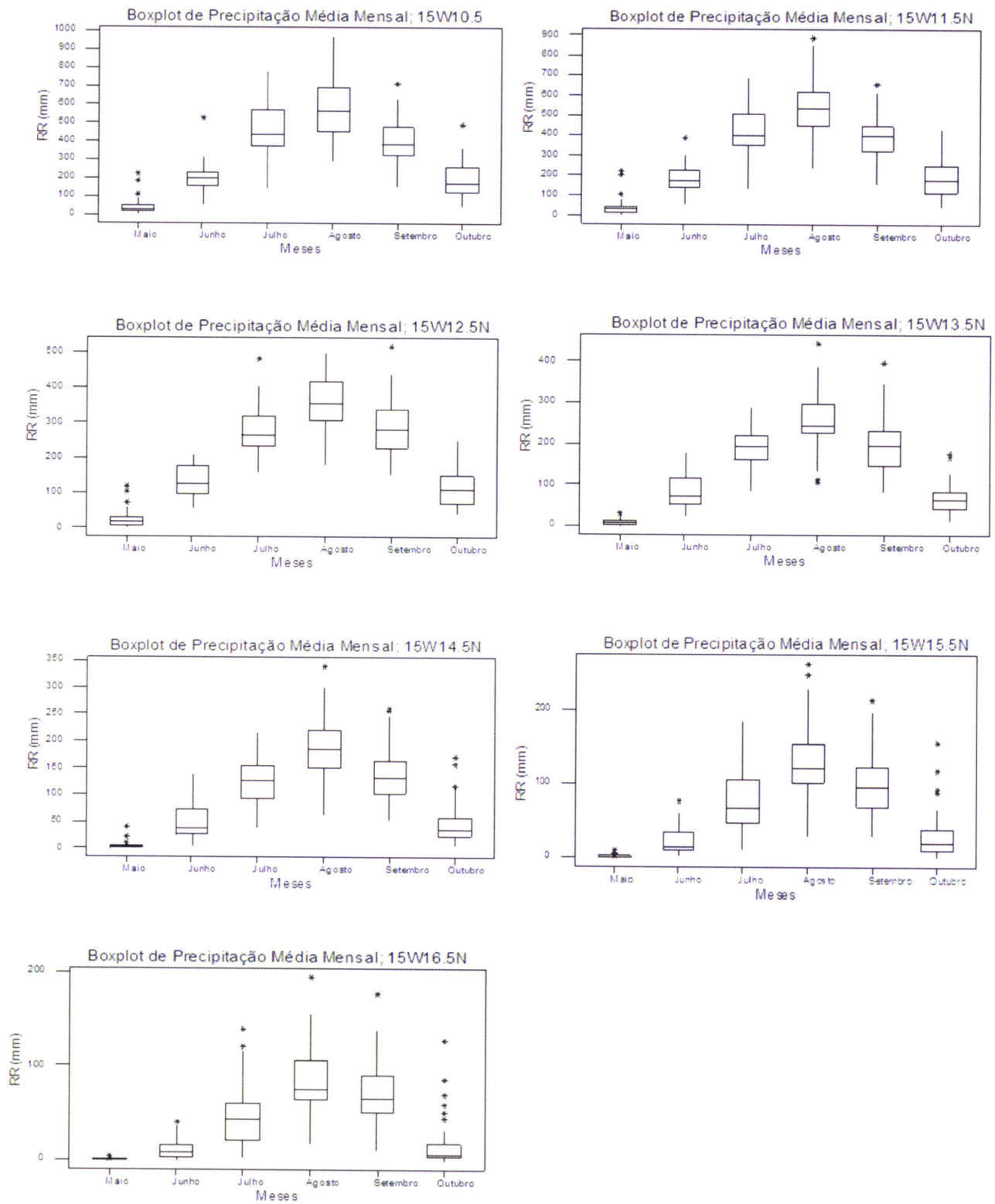
Análise Sazonal; 15W16.5N



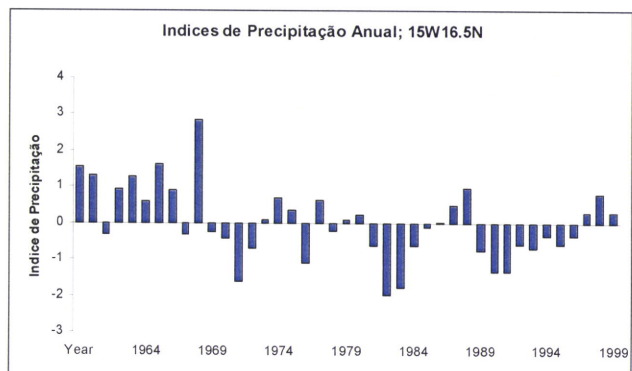
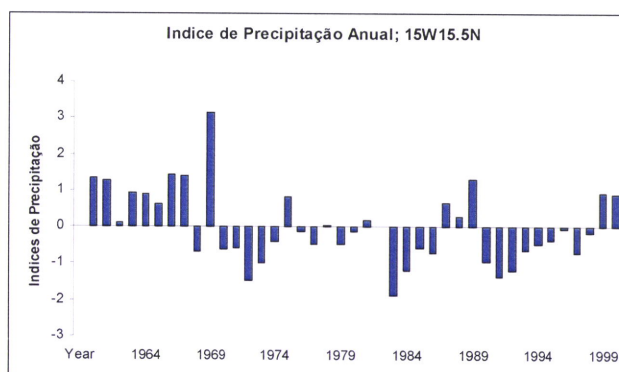
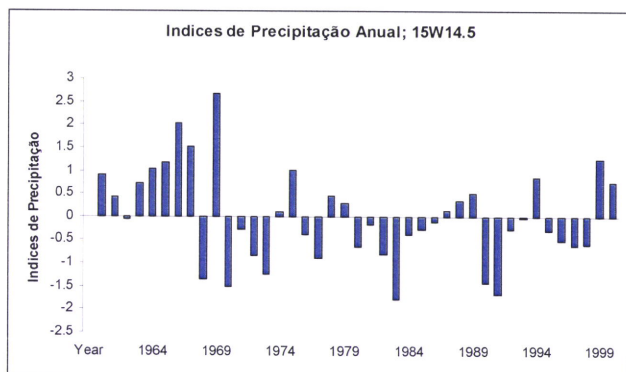
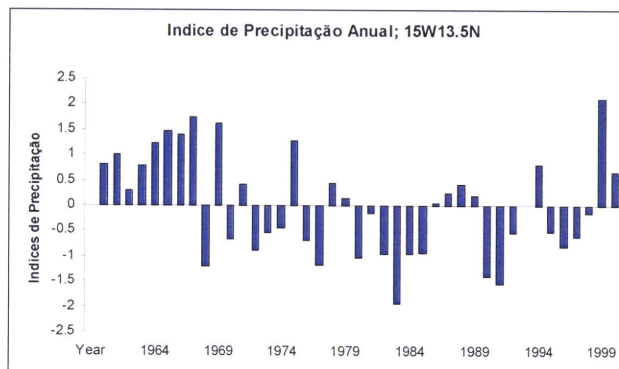
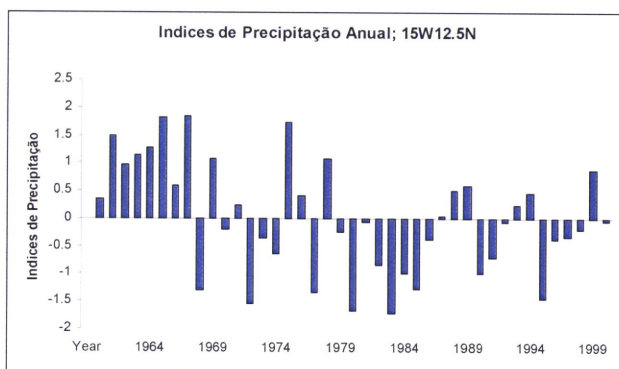
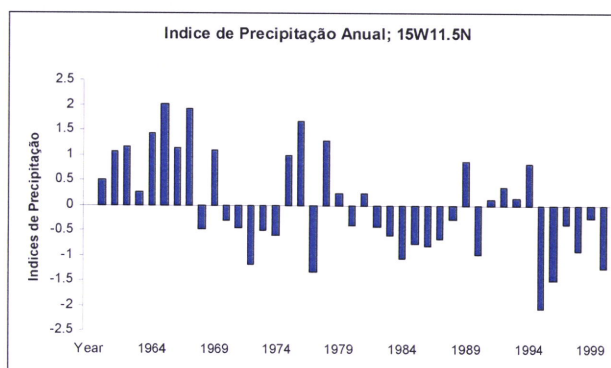
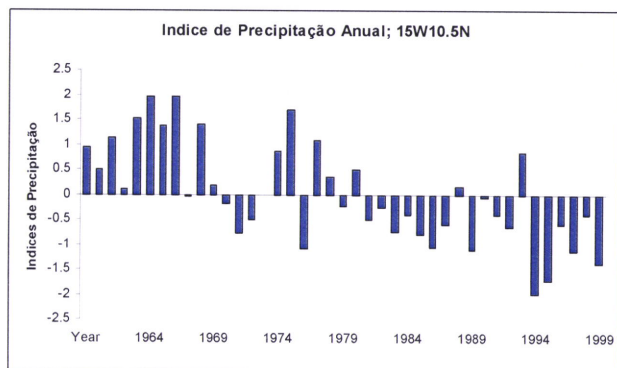
Análise em Componentes; 15W16.5N



III.E) Boxplot de Precipitação Média Mensal



III.F) Índices de Precipitação Anual; Sahel-Oeste (15°W)



III.G) Análise Espectral da Precipitação Anual (1960-2000)

